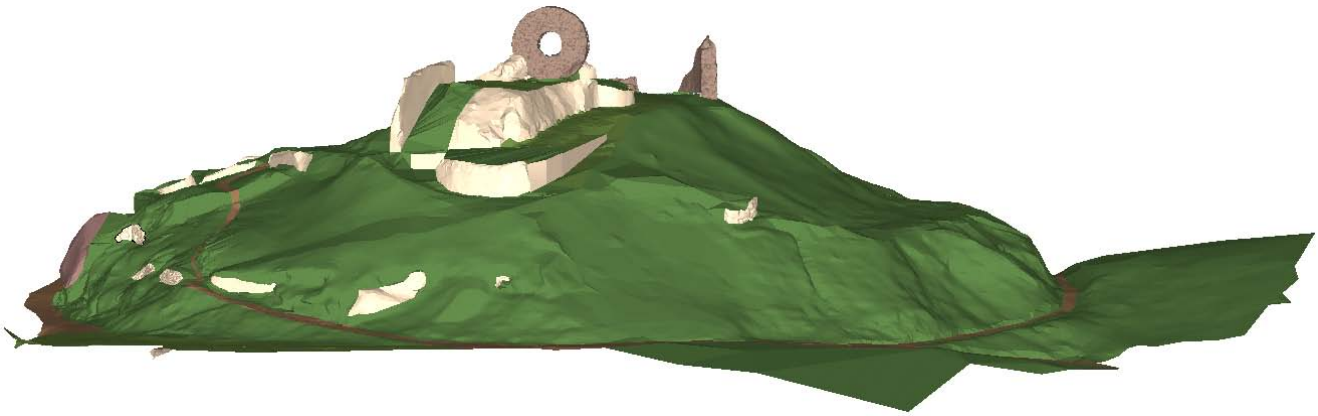
Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA
Spécialité TOPOGRAPHIE

Etude de la modélisation d'une maquette 3D et de l'intégration de données.

Application au projet archéologique et patrimonial de Thann (Alsace).



Présenté **le 21 Septembre 2011** par **Solveig BERGER**

Réalisé au sein de l'entreprise : **Laboratoire LSIIT**
Equipe TRIO/INSA
24 Boulevard de la Victoire
67100 STRASBOURG

Directeur de PFE : **Mlle Céline STEINER, Agent du développement économique et local de la ville de Thann**

Correcteurs : **M. Mathieu KOEHL, Maitre de conférences, INSA Strasbourg**
M. Emmanuel ALBY, Maitre de conférences, INSA Strasbourg

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des membres du laboratoire de photogrammétrie de l'INSA de Strasbourg, et tous ceux que j'ai pu côtoyer durant mon cursus, pour leur sympathie et leur gentillesse, et qui m'ont permis de passer ces 3 années d'études dans la bonne humeur.

Plus particulièrement, je remercie M. Mathieu KOEHL, mon encadrant de stage et 2ème correcteur, pour m'avoir proposé ce sujet, m'avoir aidée à le mener à bien et pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de ce projet.

Je remercie également Melle Céline STEINER, agent du développement économique et local de la ville de Thann et maître de stage, ainsi que M. Michel HABIB, 1er adjoint au maire de la ville de Thann, pour leur implication dans ce projet, leur sympathie et leur soutien.

Je tiens à remercier M. Jacky KOCH, archéologue au sein du Pôle Archéologique Interdépartemental Rhénan et encadrant de stage, pour m'avoir fait découvrir les métiers de l'archéologie, pour sa grande gentillesse et son aide précieuse dans la lecture et la compréhension des archives archéologiques.

Merci à M. Pierre GRUSSENMEYER, responsable du groupe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique), pour m'avoir accueillie au sein du laboratoire.

Je remercie également M. Emmanuel ALBY, maître de conférences et 1er correcteur, pour ses conseils et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Je tiens à témoigner toute ma sympathie à M. Samuel GUILLEMIN, technicien de recherches, et M. Bernard GRANDMOUGIN, technicien informatique, pour leur aide précieuse, leur bonne humeur et leur bienveillance.

Merci à mon camarade et ami Vincent CAILLET, qui a également réalisé son stage au sein du laboratoire, pour ses conseils avisés, son amitié et sa jovialité.

Je remercie également M. Hakim BOULAASSAL, M. Mostafa MOHAMED et M. Ibrahim ZEROUAL, du groupe PAGE, pour leur accueil chaleureux au sein du laboratoire et leur grande sympathie.

Pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes études, je tiens à remercier ma famille, et plus particulièrement ma mère, Dominique BERGER, pour son aide très précieuse lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie enfin Benjamin DURAND, pour m'avoir soutenue, épaulée et rassurée tout au long de ce projet.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières iii
Introduction 1
1 Etude bibliographique 5
1.1 Approche des méthodes classiques d'archéologie 7
1.1.1 Prospections et fouilles archéologiques 7
1.1.2 Enregistrement des données archéologiques 9
1.1.3 Numérisation des données 10
1.1.4 Diffusion et partage des données 11
1.2 Lasergrammétrie terrestre et photogrammétrie au service du patrimoine archéologique et culturel 13
1.2.1 Lasergrammétrie Terrestre 13
1.2.2 Photogrammétrie et restitution 3D 17
1.3 La modélisation 3D 18
1.3.1 Principe 18
1.3.2 *Google Sketchup* 19
2 Acquisition et traitements numériques 21
2.1 Acquisition des données 3D 23
2.1.1 Lasergrammétrie terrestre 23
2.1.2 Photogrammétrie 24
2.2 Traitements numériques des points 3D 28
2.2.1 Nettoyage et segmentation des points 3D 28
2.2.2 Maillage des points 3D 31
2.3 Modélisation 3D 32
2.3.1 Correction des maillages 32
2.3.2 Création des raccords 33
3 Intégration de données 2D au modèle 3D 35
3.1 Analyse et gestion des données 37
3.1.1 Analyse du rapport de M. Ehretsmann : objectif a atteindre 37
3.1.2 Gestion des données numériques 38
3.2 Vectorisation des coupes archéologiques 39
3.2.1 Numérisation et description des outils de vectorisation 39
3.2.2 Découpage des données et création des coupes vectorielles 41

3.3 Géoréférencement : Contraintes et solutions 41
3.3.1 Inversion des points d'extrémité 42
3.3.2 Position des points d'extrémité 42
3.3.3 Nombre de points de références 44
3.4 Intégration des coupes à l'espace 3D et au modèle 3D 44
4 Résultats et applications 49
4.1 Résultats 51
4.1.1 Modèle 3D du site 51
4.1.2 Coupes vectorielles 3D 52
4.1.3 Assemblage des résultats 3D 53
4.2 Utilisation archéologique 54
4.2.1 Exploitation du modèle 3D 54
4.2.2 Exploitation des coupes 3D 54
4.3 Potentialités des résultats visuels 55
4.3.1 Habillage des élements 3D 55
4.3.2 Niveau de détail des résultats 3D 57
4.4 Potentialités de diffusion numérique 57
4.4.1 Vidéo virtuelle de présentation 57
4.4.2 Panoramas 58
4.5 Intégration dans un Système d'Information Géographique 59
Conclusion et perspectives 63
Liste des figures 65
Liste des tableaux 67
Références bibliographiques 69
Ouvrages articles et thèses 69
Documents de formation 70
Sites internet 70

INTRODUCTION

Le Château de l'Engelbourg, objet de cette étude, fut construit en nid d'aigle au début du 13ème siècle, au sommet du Schlossberg. Il est situé sur le territoire de la commune de Thann Haut-Rhin, (Alsace), au carrefour de l'Alsace et de la Lorraine, et domine le débouché de la vallée de la Thur. Sa position stratégique en fit la cible de destructions systématiques au cours du 17ème siècle, et Louis XIV acheva son sort en ordonnant sa démolition en 1673, après le rattachement de l'Alsace à la France. Il n'en reste aujourd'hui que peu de vestiges, dont une section de tour d'environ 7m de diamètre et 4m de large posée sur sa tranche, caractéristique unique dans le paysage castral régional. Elle est visible depuis la vallée et, baptisée « l'Œil de la sorcière », est devenue un attrait phare de la commune.

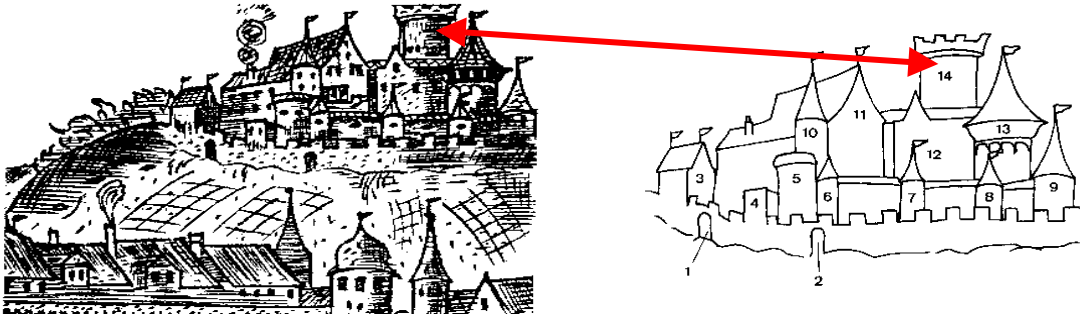


FIGURE 1 - CHATEAU DE THANN (ENGELBOURG). A GAUCHE : DETAIL DU FRONTISPICE DE SCHENK, 1628. A DROITE : SCHEMA DES ELEMENTS DE CONSTRUCTION CORRESPONDANT. EN ROUGE : TOUR DEPUIS LAQUELLE L' « ŒIL DE LA SORCIERE » EST ISSU.

FIGURE 2 - PHOTOGRAPHIE DE L'« OEIL DE LA SORCIERE ».

Le site, qui s'étend sur un hectare environ, fait depuis plusieurs années l'objet de nombreuses études archéologiques et est aujourd'hui au cœur d'un projet de valorisation des vestiges du château de l'Engelbourg. Ce projet s'inscrit plus généralement dans le cadre d'un programme de mise en valeur patrimoniale, artistique et touristique du site, à l'initiative de la ville de Thann et conduit par Céline Steiner, agent du développement économique et local de la commune. Jacky Koch, archéologue territorial du PAIR (Pôle Archéologique Interdépartemental Rhénan) est en charge de l'étude archéologique, et Anne Fontaine, médiatrice du patrimoine et chargée de la valorisation des sites et des collections au PAIR, assure la valorisation et diffusion de l'étude. C'est donc avec la coopération de tous ces acteurs, ainsi que du premier adjoint au Maire de la ville de Thann, Michel Habib, qu'intervient l'équipe de l'INSA de Strasbourg, du laboratoire LSIIT/ TRIO pour participer à l'élaboration de ce programme. Il est en effet question, parmi les nombreux travaux prévus, de réaliser un modèle 3D du site en son état actuel, autrement dit, une maquette virtuelle « telle que saisie », exploitable aussi bien d'un point de vue culturel et touristique que scientifique, que par des services de recherches archéologiques. L'équipe de l'INSA a en charge la réalisation de cette maquette, de l'acquisition des données jusqu'à la livraison du modèle virtuel, grâce à des instruments et outils logiciels de dernières générations. Les membres du groupe doivent également intégrer à cette maquette 3D, des données d'archives 2D, issues de la campagne de fouilles de M. Ehretsmann réalisé en 1992. Ces données représentent notamment des coupes archéologiques dessinées par M. Ehretsmann, dont la Figure 3 est un exemple, et proviennent de sondages réalisés sur l'ensemble du site (env. une quinzaine de sondages).

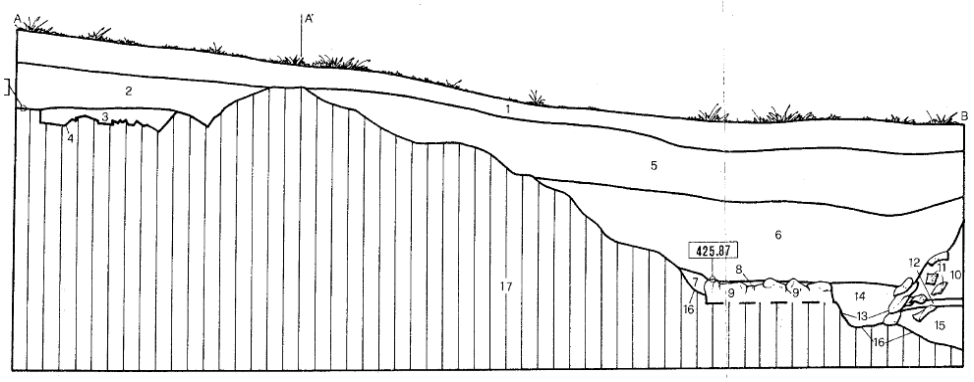


FIGURE 3 - COUPE ARCHEOLOGIQUE EXTRAITE DU RAPPORT DE LA CAMPAGNE DE FOUILLES DE M. EHRETSMANN, 1992.

Le rapport de M. Ehretsmann est une source d'informations pour la découverte du site, grâce aux plans et illustrations qui y sont rassemblés, ainsi qu'aux analyses archéologiques et historiques qu'il a détaillées. Nous avons également à disposition le plan du géomètre expert en charge du levé de l'époque, M. Ortlieb, dans lequel figurent notamment les coordonnées des extrémités des sondages réalisés. Nous avons choisi de conserver le mode de délimitation du site en 6 secteurs géographiques, explicités sur le plan ci-dessous (Figure 4), que M. Ehretsmann a mis en place lors de son étude.

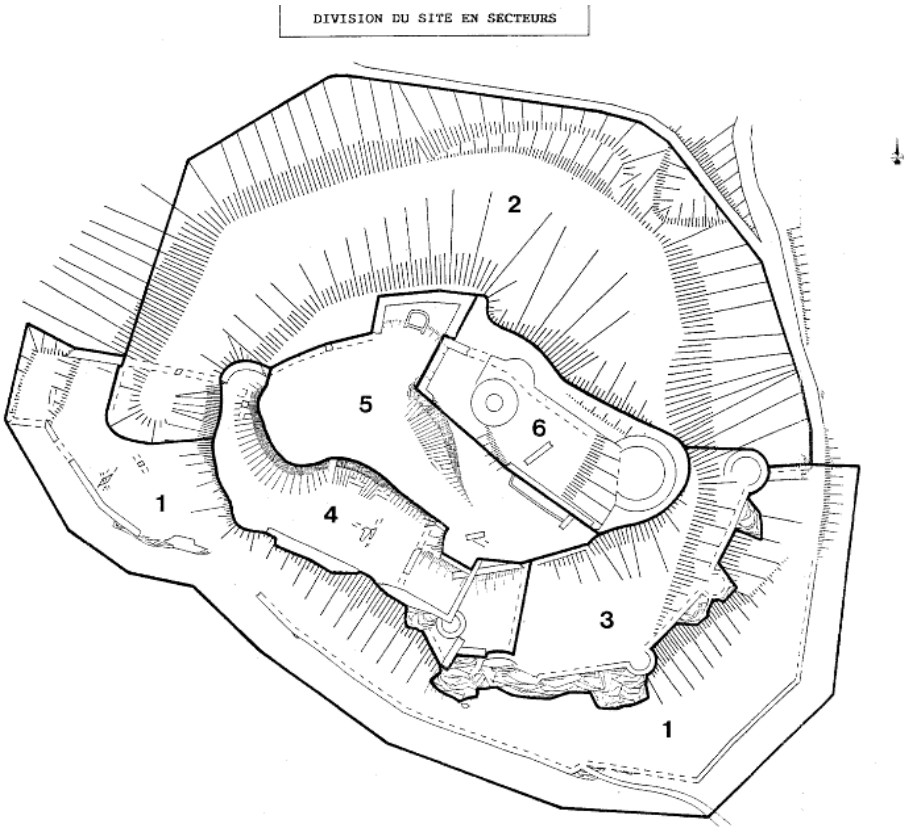


FIGURE 4 - PLAN DU SITE DIVISE EN SECTEUR

De plus, afin de rendre la manipulation informatique aussi fluide que possible, chaque secteur est redécoupé en unités élémentaires, selon le type d'objet qu'il représente (mur, rocher, etc.). Ce découpage arbitraire est lié à une volonté plus générale de normalisation des fichiers de données, pour la compréhension et l'homogénéité du projet.

La perspective d'une base de données associée à ce modèle 3D étant à l'ordre du jour, cette classification codée se révèle d'autant plus indispensable.

Les objectifs de ce *PFE* sont les suivants :

- Numérisation (vectorisation) des données archéologiques 2D
- Acquisition de données numériques 3D du site
- Modélisation numérique à partir des données 3D
- Visite virtuelle du site
- Intégration des données 2D au modèle 3D
- Mise en place de l'automatisation et de l'optimisation des procédures réalisées
- Réflexion sur la mise en place d'une base de données liée au modèle 3D

Dans l'optique d'une pérennisation de ces travaux et de leur exploitation, l'accent est également porté sur la mise en place de procédures détaillées et reproductibles des opérations réalisées.

Ce mémoire s'articule autour de trois parties :

I. Etude bibliographique
II. Acquisition et traitements numériques
III. Intégration de données 2D au modèle 3D
IV. Résultats et applications

1 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de l'étude bibliographique, structurée et synthétisée en quelques paragraphes.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux procédés archéologiques classiques, puis aux techniques de lasergrammétrie et photogrammérie appliquées à notre étude. Nous aborderons ensuite la modélisation 3D.

SOMMAIRE

1.1 Approche des méthodes classiques d'archéologie....**6**
4.1.1 Prospection et fouilles archéologiques....6
4.1.2 Enregistrement des données archéologiques....8
4.1.3 Numérisation des données....9
4.1.4 Diffusion et partage des données....10
1.2 Lasergrammétrie terrestre et photogrammétrie au service du patrimoine archéologique et culturel....12
1.2.1 Lasergrammétrie terrestre....12
1.2.2 Photogrammétrie et restitution 3D....16
1.3 Modélisation 3D....17
1.3.1 Principe....17
1.3.2 Google Sketchup....18

1.1 APPROCHE DES METHODES CLASSIQUES D'ARCHEOLOGIE

Dans ce paragraphe, nous décrivons succinctement les étapes classiques de travaux archéologiques.

1.1.1 PROSPECTIONS ET FOUILLES ARCHEOLOGIQUES

[Joutnot, 2009] décrit l'information archéologique comme un document historique et non écrit de l'histoire, mis en lumière par les fouilles et les observations de l'archéologue. La prospection est donc l'une des premières étapes de reconnaissance d'un site, comme une lecture rapide et non destructrice du site permettant de repérer les parties les plus pertinentes à étudier. Elle peut s'effectuer de différentes manières, selon la nature du terrain et le degré de précision des recherches mais ne doit pas être destructrice du site. [Guyot, 2005] nous éclaire sur les deux grands domaines de prospection en différenciant l'observation (surfaces apparentes, traces de natures diverses, etc.), de l'introspection au sol (utilisation de sondes à distance par exemple). L'avènement de la photographie aérienne et des levés lasergrammétriques, apportent une nouvelle dimension de l'observation des sites, que Jacques Dassié (pour la photographie) a été l'un des premiers à mettre au service des études archéologiques dans les années 1960 (@Archaero[2007]). Ces outils permettent une approche plus globale du site à étudier, et parfois mettent en lumière des zones d'intérêt archéologique. La Figure 5, acquise par Jacques Dassier, rend compte des nuances colorées visibles dans les champs et met en évidence l'existence de constructions en profondeur. Le plan est quasiment visible en son entier et donne une première idée de l'étendue et de la structure du site.

FIGURE 5 - PHOTOGRAPHIE AERIENNE DE SAINT GERMAIN DE LUSIGNAN CM, CAMP NEOLITHIQUE DE LA COTERELLE. JACQUES DASSIER. [@ARCHAERO.COM]

L'introspection au sol, autre méthode d'observation, fait appel aux propriétés physiques du terrain pour observer le sous-sol ou les parties non visibles du terrain, et peut être de différentes natures, géophysique, électrique, magnétique, etc. (@Archeo.ens[2011).

Les sondages constituent la deuxième étape de travaux archéologiques, avant la fouille à proprement parler. Ils peuvent être assimilés à une méthode de prospection, car ils ont pour fonction de délimiter une zone de fouilles, mais à l'instar de la fouille, c'est un procédé destructeur du terrain. Le sondage

permet de confirmer ou non une hypothèse établie par observation et d'enregistrer les premières informations de couches visibles. [Giligny, 2006] distingue trois types de sondages :

- Les sondages en quinconce : ce sont des rangs de tranchées discontinues plus ou moins longues, et disposées en quinconce.

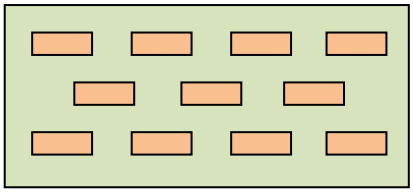


FIGURE 6 - SCHEMA DE SONDAGES EN QUINCONCE

- Les sondages par tranchées continues : ce sont des bandes de tranchées continues, disposées les unes à coté des autres.

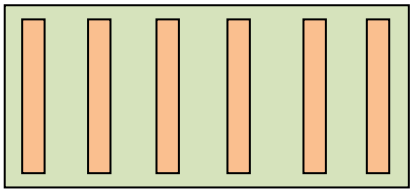


FIGURE 7 - SCHEMA DE SONDAGES PAR TRANCHEES CONTINUES

- Les carottages par profils en long : ce sont des carottages régulièrement espacés et effectués en quadrillage.

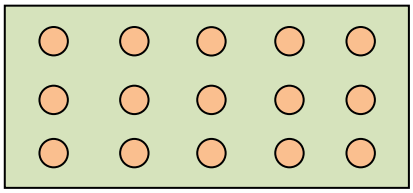


FIGURE 8 - SONDAGES PAR CAROTTAGES

Ensuite viennent les fouilles archéologiques, permettant de mettre en lumière des éléments enfouis ou des superpositions de strates géologiques. Il existe ici aussi plusieurs catégories de fouille.

- La fouille stratigraphique : fouille verticale et chronologique permettant de dater des évènements et de retracer l'histoire du terrain en étudiant les différentes strates géologiques, et les éléments archéologiques qui leur appartiennent. La fouille stratigraphique se base sur l'unité stratigraphique, définie comme la plus petite subdivision d'une séquence stratigraphique donnée [Giligny, 2006]. Ce procédé suit deux lois fondamentales de géologie que sont la loi de continuité, et la loi de superposition [Giligny, 2006]. D'après la loi de continuité, chaque strate est délimitée à sa base et en son sommet par un bassin de dépôts, et d'après la loi de superposition, les couches profondes sont plus anciennes que celles qui les recouvrent. L'analyse de l'interaction entre les strates est donc l'un des objectifs principaux de la fouille stratigraphique, indispensable à la compréhension historique du site. Afin de mieux visualiser les couches et leurs liens, les archéologues s'appuient sur la matrice de Harris, qui permet une représentation simple et schématique de la situation réelle. La Figure 9 représente les trois relations principales du système de Harris.

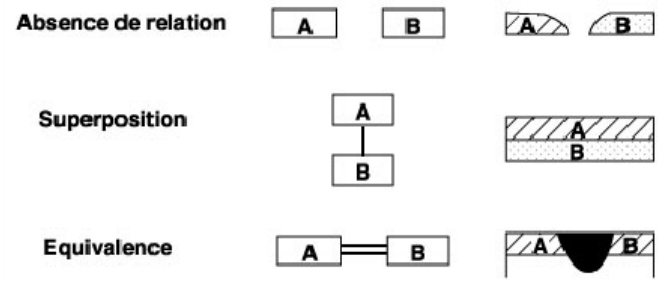


FIGURE 9 - RELATIONS PRINCIPALES DE LA MATRICE DE HARRIS [F. GILIGNY, 2006]

- La fouille en air ouverte : fouille horizontale généralement peu profonde, ayant pour but de visualiser la répartition spatiale des éléments de surface. Elle consiste en un décapage de la terre végétale, jusqu'à apparition de la première strate, puis à la fouille par secteurs restreints (généralement des carrés, côte à côte ou non) [Miller, 2005].

- Combinaison de fouilles verticales et horizontales : la méthode de Wheeler est définie par un découpage horizontal en zones (généralement des carrés de terrain) et pour chaque zone, une fouille stratigraphique est réalisée, plus ou moins profonde, et dont le niveau le plus élevé est repéré par des bermes.

1.1.2 ENREGISTREMENT DES DONNEES ARCHEOLOGIQUES

Lors de la fouille archéologique, les éléments mis en lumière sont quasi systématiquement détruits par la découverte des strates inférieures, ou tout du moins déplacés. Pour ne pas perdre de données, il est indispensable d'enregistrer au fur et à mesure de l'avancement de la fouille, toutes les informations recueillies, dans leur environnement. Chaque donnée devant être ramenée en laboratoire doit être associée à sa fiche d'enregistrement, contenant ses principales caractéristiques: le numéro d'autorisation de fouille, le numéro du chantier, la description de l'élément, les principaux matériaux, etc. Pour la topographie du terrain, l'agencement des strates et le bâti, dont les informations et la description doivent être enregistrées sur place, les archéologues utilisent le dessin et la photographie, que [Ligny, 2004] considère comme complémentaires. Le dessin sur papier, généralement millimétré, vise à représenter le plus fidèlement et clairement possible l'élément étudié afin de le reproduire plus précisément en laboratoire (le plus souvent sous format numérique). Le dessin fait appel à la propre interprétation de l'archéologue et à son talent d'artiste mais il suit quelques règles de représentation, permettant une première lecture claire et rapide. Il donne également la possibilité d'insister ou non sur des zones choisies pour faire ressortir des détails importants qui se distinguent difficilement à l'œil nu ou sur une photographie, et de schématiser ce qui ne nécessite pas de précision. L'élément est représenté de façon proportionnée, et localisé dans un repère x y z. On définit un point de référence de coordonnées x y z (0;0;0). Les coordonnées x y z des autres points levés sont ensuite déterminées avec un théodolite ou une station totale, à partir du point de référence et d'une orientation [Miller, 2005]. En complément du dessin, la photographie permet de figer la réalité du site au fur et à mesure de l'avancement des fouilles. Il est ainsi possible d'enregistrer les éléments dans leur contexte le plus large, et plus objectivement qu'avec le dessin, c'est un « moyen de rendre compte » selon P. Racinet [2004]. Utilisée dès le 19ème siècle par l'égyptologue Richard Lepsius lors de campagnes de fouilles en Égypte, alors que cette technique n'existait que depuis quelques années [Feyler, 1987], la photographie, grâce à son évolution rapide, prend une place de plus en plus importante dans les méthodes d'enregistrement des données. En effet, de l'argentique au numérique, les résultats visuels, les possibilités d'exploitation et de conservation sont divers et adaptables aux différents types

d'analyse [Racinet, 2004]. La photographie numérique prend cependant le pas sur l'analogique et devient un outil indispensable sur le terrain. Véritable donnée d'enregistrement de fouille, elle présente de nombreux avantages, notamment avec un rapport qualité/prix de plus en plus attrayant. Les photographies peuvent être prises en quantité considérable, supprimées et remplacées au besoin, et être traitées quasi instantanément sur le terrain. Les outils numériques les plus utilisés depuis les années 1990 sont par exemple les logiciels de traitement de l'image brute, pour l'amélioration des couleurs, le recadrage, etc. On peut noter la suite *Adobe* avec *Photoshop* et *Illustrator*, ou encore *The Gimp*. Les photos peuvent de plus être facilement stockées sur un support numérique et offrent aujourd'hui une très bonne résolution pixellaire, même dans les entrées de gamme [Remondino, 2011]. La double évolution de la qualité des outils photographiques et numériques rend possible une exploitation au niveau scientifique [Racinet, 2004] [Pierrot Deseilligny et al, 2011]. [Giligny, 2006] distingue la photographie documentaire, qui doit contenir une échelle de présentation et est utilisée pour l'analyse, de la photographie illustrative, généralement destinée à la publication. Cet engouement pour l'utilisation de la photographie en archéologie ne cesse de grandir avec l'arrivée de nouvelles applications numériques. Des solutions de plus en plus accessibles et automatisées permettent en effet de représenter des éléments en 3D à partir de photographies de ceux-ci (cf. 1.2.2, page 17). Dans le même objectif de réalité virtuelle et de représentation 3D, le scanner laser apparait de plus en plus sur les chantiers de fouille. Cet instrument permet d'enregistrer rapidement la position tridimensionnelle des points qu'il balaie à l'aide de son faisceau laser, et peut également enregistrer la couleur du point pour un rendu plus réaliste [Landes, 2010] (cf. chapitre 1.2.1, page 13). Appliqué à un chantier de fouilles, cet outil fait des informations enregistrées par l'appareil une véritable banque de données brutes, exploitable à de nombreuses échelles.

1.1.3 NUMERISATION DES DONNEES

Bien que le travail d'observation et de fouille se fasse toujours sur les éléments d'origine et leur contexte, une part de l'analyse archéologique s'effectue désormais sur les versions numérisées de ces données de fouille. Les croquis sont dessinés sur ordinateur à partir des cotes prises sur le terrain ou bien vectorisés, c'est-à-dire scannés pour devenir des images raster, par-dessus lesquelles on redessine numériquement et dynamiquement les éléments. Les solutions de vectorisation sont nombreuses sur le marché et diffèrent par le temps d'exécution et la qualité des résultats obtenus. On peut citer *AutoCAD* [Le Frapper, 2010a et 2010b], la suite d'application *Wise Image* de RasterTech [@WiseImage, 2008], *Articque* [@Articque, 2011]. Egalement, Le logiciel *ArcMap* d'ESRI permet via son extension ArcScan une vectorisation semi-automatique des images par intégration de celles-ci et création de polylignes et polygones. L'avantage par rapport aux logiciels de dessins tels qu'*Illustrator* est que les contours créés conservent leurs informations propres (les formules mathématiques qui les définissent) et une fois créés, ils peuvent être sélectionnés et modifiés indépendamment des autres vecteurs. Parmi les logiciels gratuits, nous pouvons citer *RasterToVector* ou encore *VectorMagic* [@VectoMagic, 2009] disponible en service web. Ce dernier est très simple d'utilisation, et le temps de traitement est très court, mais il ne permet pas de sélectionner individuellement chaque polyligne (Figure 10 et Figure 11).

FIGURE 10 - EXTRAIT DE L'IMAGE RASTER D'UNE COUPE.

FIGURE 11 - VECTORISATION DE L'EXTRAIT AVEC VECTORMAGIC.

1.1.4 DIFFUSION ET PARTAGE DES DONNEES

Avec le développement des outils informatiques destiné au grand public comme aux professionnels, l'accès à l'information et les méthodes de communication passent de plus en plus par le numérique.

L'outil informatique devient, au-delà du partage et de l'homogénéisation des informations, un moyen de représentation chronologique et spatiale [@MaisonRené-Ginouves, 2011], valorisant les résultats de fouilles et destiné à un public de plus en plus large. Les scientifiques sollicitent aujourd'hui les techniques numériques telles que le dessin assisté par ordinateur (DAO) et la création de modèles numériques 3D [Santacana i Mestre et Carme Belarte Franco, 2005]. En effet, au-delà de l'aspect visuel, la modélisation 3D permet des recoupements jusque-là difficiles et des analyses de comportements et de mécanismes tout à fait nouveaux. La simulation d'éléments dont certaines parties ont disparues est également un outil très précieux. Ces techniques sont encore récentes et tous les archéologues ne sont pas en mesures de s'y pencher. Beaucoup de projets de modélisation sont développés par des entreprises privées comme par exemple Héritage Virtuel basée à Besançon [@Héritage-virtuel, 2011], mais de plus en plus de logiciels accessibles et gratuits sont dédiés à cette application.

Afin de mieux structurer les données d'archive et de les mettre à disposition, les scientifiques ont mis en place des bases de données informatiques où sont classées leurs données d'enregistrement et leurs analyses. Les protocoles d'enregistrement suivent en général la même logique d'inventaire et de marquage. Il appartient cependant à chaque organisme de suivre ses propres méthodes, adaptées à son organisation interne, et bien que de nombreux manuels et ouvrages aient été rédigés dans le but d'établir des règles générales d'enregistrement, beaucoup ont adopté une structure de base de données et une méthodologie propre, difficilement perturbable. Cela représente un frein au recoupement des informations entre les fouilles de différents organismes, et empêche une diffusion homogène des données. Beaucoup d'éléments précieux se retrouvent ainsi archivés de manière plus ou moins pérenne dans des bibliothèques d'artéfacts et perdent une partie leur potentiel d'information. En 2008, le Ministère de la Culture et de la Communication a distribué aux organismes chargé du marquage des collections publiques un guide méthodologique [Ministère de la Culture et de la Communication, 2008] pour « l'évaluation des produits et procédés de marquage », visant à instaurer une « homogénéisation des pratiques de marquage des collections publiques ». Ce guide, né de plusieurs programmes d'essais du Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) et du Centre de

Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), s'avère difficilement adoptable pour de nombreux archéologues, car très généraliste, et parfois non adapté aux normes réellement appliquées.

Le développement des outils informatiques tels les systèmes d'information géographique et la transmission d'information par internet poussent les archéologues à se diriger de plus en plus vers des normes collaboratives et partagées. [Elise Meyer, 2007] évoque la possibilité de mettre en place un SI accessible à tous les professionnels ayant vocation au stockage et partage des leur données.

Jusque dans les années 1980, début de la commercialisation des premiers systèmes d'information pour les micro-ordinateurs [Desachy, 2004], l'enregistrement des données était effectué manuellement et répertorié dans des fiches descriptives papier. Ces nouveaux outils, couramment utilisés de nos jours ont pour avantage un gain de temps pour la réalisation des dessins (avec néanmoins une maitrise minimum des logiciels), et un gain de précision et de réalisme. La vectorisation d'images est particulièrement utilisée pour la réalisation de plans, la reproduction numérique de dessins ou photographies réalisés sur le terrain, basé sur le principe du calque. Mais ils permettent également l'intégration de données anciennes aux traitements informatiques, ce qui encourage les archéologues à rouvrir des dossiers parfois délaissés pour des analyses plus poussées. Dans notre étude, les coupes archéologiques de M. Ehretsmann sont destinées à être vectorisées et intégrées au modèle 3D.

A ces évolutions s'ajoute l'avènement des outils de création et de gestion de bases de données, dont les domaines d'applications ne cessent de s'élargir, et qui apportent une nouvelle manière de penser l'information archéologique.

Le Système d'Information géographique permet d'associer des données alphanumériques à des données graphiques. Les données alphanumériques sont classées dans des bases de données, structurées en tables d'objets. Chaque table d'objets comporte un certain nombre de champs définissants la nature et les caractéristiques des objets. Par exemple la table « céramique » peut comporter les champs « numéro d'identification » et « date de découverte ». Cette définition dans notre cas est complexe car il est nécessaire de bien connaitre les interdépendances qui lient tous les éléments (secteur géographique, composition chimique, époque historique, lieu, etc.). C'est en partie pour cette raison qu'il est difficile d'établir un seul et même système, chaque archéologue ayant sa vision logique de gestion des données. Il existe aujourd'hui des outils décrivant l'organisation des données, et appelés Modèles Conceptuels de Données (MCD). L'INSERM (Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale) définit le MCD comme *un document qui sert à décrire de façon formelle et standardisée les données nécessaires à la résolution du problème de départ, sans se soucier de la technique* [@infodoc.inserm, 2009]. Le MCD permet de représenter la structure du système d'information et les interdépendances qui existent entre les données. Ce document offre la possibilité aux archéologues de partager leurs structurations des données et certains autres peuvent utiliser des modèles existants pour leurs propres données. Encore expérimentale il y à 30 ans, la mise en place de bases données archéologiques est devenue quasi-systématique pour de nombreux groupes d'archéologues. Le Laboratoire Archéologie et Territoires a développé à partir des années 1990, pour des travaux de fouilles menés à Tours, un système d'exploitation des données de fouilles, présenté dans *Les Petits Cahiers d'Anatole* [Galinié et al., mai 2005]. Ce système aujourd'hui appelé *AsSol* et comptant trois modules d'exploitation de données de fouilles, a été conçu pour gérer les données terrain, faciliter l'exploitation post-fouilles, et permettre le transfert d'informations à d'autres systèmes d'information, notamment des Systèmes d'Information Géographique. Cet exemple illustre les potentialités d'outils dédiés à la gestion et au partage des travaux archéologiques, même si ces bases de données restent aujourd'hui relativement internes et hétérogènes. [Koehl et al., 2008] décrit également l'intégration dans un SIG d'un modèle 3D de l'Abbaye de Niedermunster, levée par lasergrammétrie, ainsi que les fonctionnalités possibles.

1.2 LASERGRAMMETRIE TERRESTRE ET PHOTOGRAMMETRIE AU SERVICE DU PATRIMOINE ARCHEOLOGIQUE ET CULTUREL

Depuis l'avènement des techniques de lasergrammétrie apparues à la fin des années 1990, qui permettent notamment la restitution virtuelle d'éléments en 3D, le débat au sein de la communauté scientifique était lancé quant à sa suprématie par rapport aux techniques de modélisation 3D par photogrammétrie, voire à l'abandon de ces dernières [Pierrot Deseilligny, 2011]. Les avantages qu'offrent les outils laser ont été largement mis en avant au niveau technique d'une part (précision des mesures, quantité et rapidité d'acquisition) mais également au niveau visuel, bien au-delà du domaine de la topographie. Les possibilités de restitutions virtuelles apportent aux professionnels, notamment aux archéologues, un nouvel outil de communication, réaliste, précis, et plus complet.

Mais aujourd'hui, l'évolution des techniques de modélisation par photogrammétrie, plus automatiques, plus accessibles et moins coûteuses, vient incontestablement réintroduire cette méthode sur le devant de la scène [El Kahza et al., 2010]. Les propriétés de chacune de ces deux techniques n'étant pas disponibles dans une seule et même technologie, la meilleure solution reste aujourd'hui une utilisation combinée [Remondino, 2011].

Nous allons tout d'abord définir les grands principes de la lasergrammétrie terrestre puis les récentes évolutions photogrammétriques en matière de restitution 3D.

1.2.1 LASERGRAMMETRIE TERRESTRE

La lasergrammétrie terrestre est une technique d'acquisition de points de surface réalisée à partir d'un balayage laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* ([Landes, 2010]) en trames régulières. L'instrument est appelé scanner laser terrestre, en opposition au scanner laser aéroporté que nous n'aborderons pas dans cette étude ([Vallet, 2011] décrit de façon détaillée le principe et les applications de la lasergrammétrie aéroportée).

Le rayon laser émis par l'appareil (en continu ou par impulsions) vient balayer la surface des éléments qu'il rencontre, et enregistre pour chaque point créé, sa distance à l'appareil, l'angle horizontal et l'angle vertical (Figure 12) [Landes, 2010]. Chaque point peut ainsi être connu en coordonnées dans le repère du scanner. L'ensemble des points forme un nuage de points 3D, visualisable en temps réel (*i.e.* au moment de l'acquisition par l'appareil).

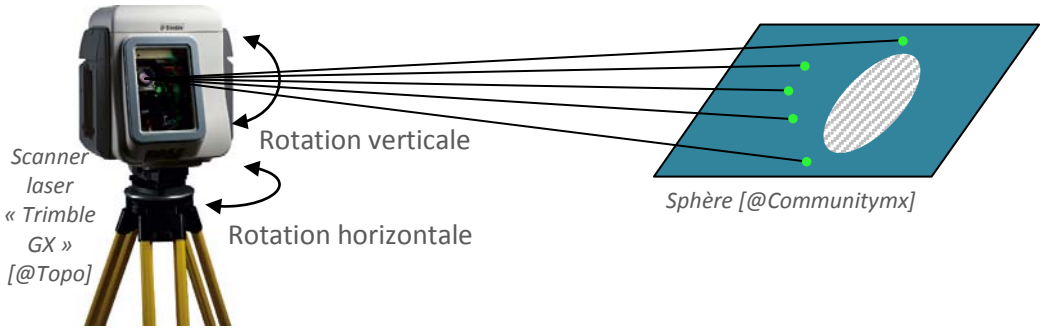


FIGURE 12 - BALAYAGE D'UNE SURFACE PAR SCANNER LASER

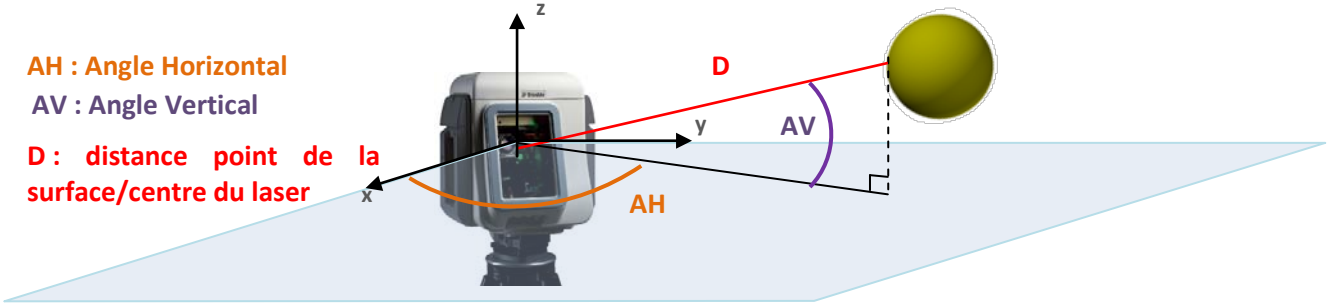


FIGURE 13 - MESURE DES ANGLES ET DISTANCES D'UN POINT DE LA SPHERE PAR RAPPORT AU SCANNER ET SON REPERE

Les coordonnées du point de la sphère dans le repère du scanner sont alors :

$$\begin{cases} x = D \times \cos(AV) \times \cos(AH) \\ y = D \times \cos(AV) \times \sin(AH) \\ z = D \times \sin(AV) \end{cases}$$

Le nuage peut être plus ou moins dense selon la résolution spatiale du scan, définie par le pas horizontal et vertical du balayage. Le pas correspond à la distance *d* entre chaque point (en horizontal et/ou en vertical) à une distance donnée *D* du scanner.

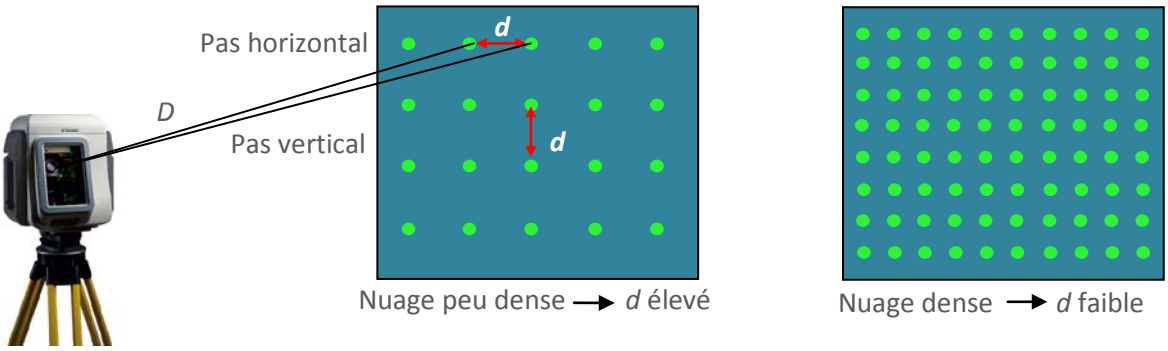


FIGURE 14 - BALAYAGE LASER DE DENSITE VARIABLE

Il existe plusieurs technologies permettant de calculer les coordonnées des points 3D et [Landes, 2010] définit trois grandes catégories :

LE SCANNER A TEMPS DE VOL

Egalement appelé scanner à impulsion, il fonctionne sur la mesure du temps écoulé entre l'impulsion du laser et l'impact sur l'objet. Cette période permet de connaître la distance du scanner au point impacté par la formule $D = c \times \frac{t}{2}$

Avec | D : la distance scanner/point de l'objet
c : Vitesse de la lumière
t : temps de parcours

La précision de la mesure de D est donc directement liée à celle de la mesure du temps de parcours, qui diminue avec des portées trop courtes. Pour pallier ce problème, le même point peut être enregistré plusieurs fois et moyenné, afin de réduire l'écart-types sur la mesure de distance et augmenter la précision finale [Grussenmeyer et al., 2011], [Landes, 2010].

LE SCANNER A MESURE DE DIFFERENCE DE PHASE

En anglais *phase shift method*, cette technique consiste à envoyer un faisceau laser de forte intensité en continu, et à déterminer entre l'onde émise et l'onde retour, le nombre entier N de longueurs d'onde (dit « ambiguïté entière ») et le déphasage$\Delta\phi$. Cette différence$\Delta\phi$ permet de calculer la distance D entre le scanner et le point de l'objet. Pour une fréquence f et une longueur d'onde λ du signal, D s'écrit:

$D = \frac{N\lambda}{2} + \frac{\lambda\Delta\varphi}{\pi}$ avec $\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda}$

La difficulté réside dans la résolution des ambiguïtés (détermination du nombre N) pour laquelle plusieurs solutions existent [Landes, 2010].

LE SCANNER A TRIANGULATION

La distance D est calculée via la résolution du triangle EPR (Figure 15), avec :
E : l'émetteur laser
P : un point de l'objet
R : le récepteur

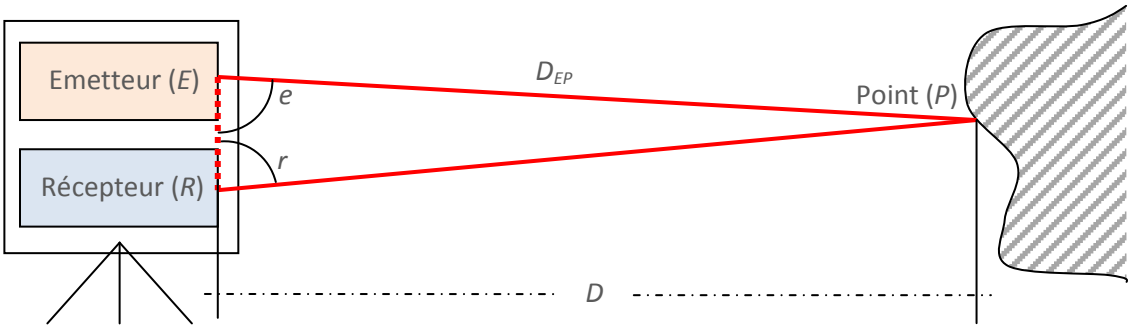


FIGURE 15 - SCHEMA EXPLICATIF DU SCANNER A TRIANGULATION

La distance D_{EP} est définie par l'équation $D_{EP} = ER \times \frac{\sin(r)}{\sin(e+r)}$

L'inconvénient de cette technique est que la précision sur D se dégrade avec le carré de la distance, et donc les portées doivent rester relativement courtes [Poitevin, 2010].

Le Tableau 1 illustre les différences techniques qu'il peut exister entre les scanners laser, à d'autres niveaux que la simple technologie d'acquisition. Chaque scanner est donc plus ou moins adapté à un contexte particulier (milieu froid ou chaud, visées longues ou courtes, etc.), et il n'existe pas d'instrument optimisé pour tous les travaux. Ce tableau tire ses informations des fiches techniques des quatre scanners comparés, ainsi que du magazine GIM International [@Gim-international, 2011] qui réalise régulièrement des comparatifs de ce type.

Marque	*Système*	*Technologie*	*Date*	*Acquisition ($x10^3$points/s)*	*Portée (m)*	*Précision*	*Champ visuel (HxV)*
Faro	Photon 20	Δφ	2009	120	0.6-120	2mm/25m	360°x320°
Leica	Scan station C10	Δ*t*	2009	50	0.1-300	4mm/50m	360°x270°
Leica	HDS 6200	Δφ	2010	1016	0.4-79	2mm/25m	360°x310°
Trimble	GX	Δ*t*	2005	5	2-350	7mm/100m	360°x60°

TABLEAU 1- COMPARATIF DE SCANNERS LASER TERRESTRES

Une liste non exhaustive des atouts et inconvénients qu'engendre l'utilisation du scanner laser est présentée dans le Tableau 2 ci-dessous.

Avantages	*Inconvénients*
Rapidité d'acquisition	Données volumineuses
Quantité de données brutes élevée	Coût de l'investissement
Pas de contact avec l'objet	Logiciels indispensables et coûteux
Fiabilité des données	Traitements lourds :
Opération rentable (rapport quantité/tps élevé)	Nettoyage des points faux ou incohérents
	Gestion des ombres laser
	Précision de la position diminuée sur visées rasantes

TABLEAU 2 - LISTING DES AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU LEVE PAR LASERGRAMMETRIE TERRESTRE

Les constructeurs proposent aujourd'hui des appareils de plus en plus compacts, légers avec des champs de balayage large, réduisant ainsi le nombre de station et permettant d'accéder à des zones étroites. Mais il existe certaines contraintes liées à l'utilisation du scanner que l'opérateur doit prendre en compte avant le balayage laser (Figure 16 et Figure 17) [Remondino, 2011].

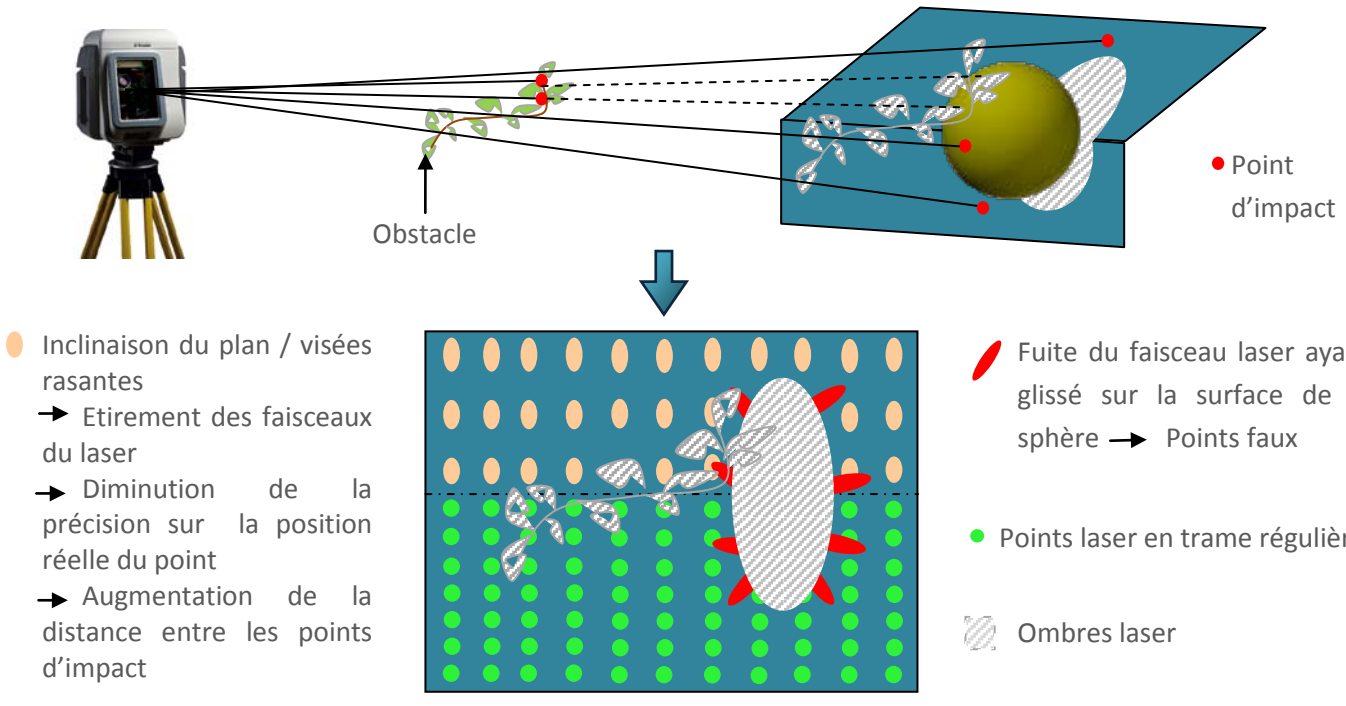
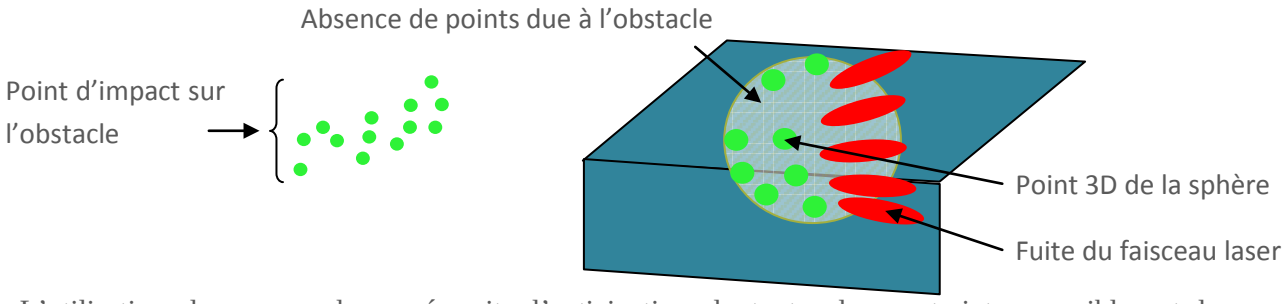

Obstacle
Point d'impact
Inclinaison du plan / visées rasantes
→ Etirement des faisceaux du laser
→ Diminution de la précision sur la position réelle du point
→ Augmentation de la distance entre les points d'impact
Fuite du faisceau laser ayant glissé sur la surface de la sphère → Points faux
Points laser en trame régulière
Ombres laser

FIGURE 16 - SCHEMA RAMENEE EN PLAN DU BALAYAGE LASER AVEC OBSTACLES



L'utilisation du scanner laser nécessite l'anticipation de toutes les contraintes possibles et les traitements ultérieurs indispensables.

FIGURE 17 - VUE PERSPECTIVE DES POINTS D'IMPACT SUR LA SPHERE ET L'OBSTACLE

Les domaines d'application de la lasergrammétrie sont très variés et concernent principalement l'industrie, l'architecture et le patrimoine, et le génie civil.

1.2.2 PHOTOGRAMMETRIE ET RESTITUTION 3D

La photogrammétrie est une technique de mesure géométrique apparue après l'invention de la photographie au XIXème siècle. Utilisée essentiellement pour la confection de cartes topographiques, elle permet de mesurer la géométrie d'un objet à partir d'images de celui-ci et se base sur la vision stéréoscopique de l'œil humain. Mais avec le développement des appareils photographiques numériques et l'apparition de logiciels de modélisation par photogrammétrie, la photogrammétrie est de plus en plus utilisée pour la restitution 3D, qui nous concerne particulièrement dans notre étude. L'institut Géographique Nationale et le Ministère de l'Education, de la Recherche et de la technologie définissent la restitution photogrammétrique comme un « *processus d'obtention d'une représentation à trois dimensions d'un objet à partir de clichés pris généralement avec une chambre métrique* » [@seig.ensg.ign, 2009]. Il s'agit pour cela de photographier l'objet à restituer selon certaines règles particulières, que le CIPA (Comité International de Photogrammétrie Architecturale) a défini dans les « 3X3 règles ».

La Figure 18 ci-dessous illustre quelques règles de prise de vue disponible dans l'aide de fonctionnement du service web ARC3D (Automatic Reconstruction Conduit) [@Arc3D].

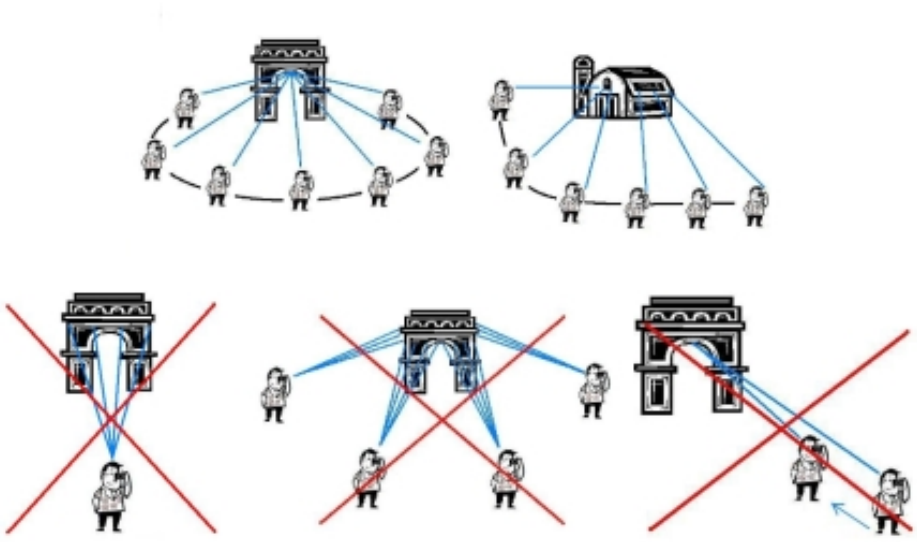


FIGURE 18 - REGLES DE PRISES DE VUE POUR LA STEREORESTITUTION

[Santacana i Mestre et al., 2005] définit la restitution archéologique comme une interprétation de l'architecture, faite à partir de l'élaboration d'hypothèses, à ne pas confondre avec les termes « reconstruction » « reconstitution ». La confusion avec la restitution photogrammétrique devient d'autant plus fréquente que, de plus en plus, la restitution archéologique passe par la conception de modèles numériques, dits « modèles virtuels ». Il existe différents types de solutions pour le traitement des images (Figure 19) [Grussenmeyer, 2003] :

- A partir d'une seule photo : avec une photo isolée de l'objet et des informations sur la géométrie de l'objet
- A partir de 2 photos : la géométrie de l'objet est inconnue, donc 2 images sont nécessaires
- A partir d'un bloc multi-image : l'objet est complexe et il est envisageable d'avoir des photos convergentes, horizontales verticales ou obliques

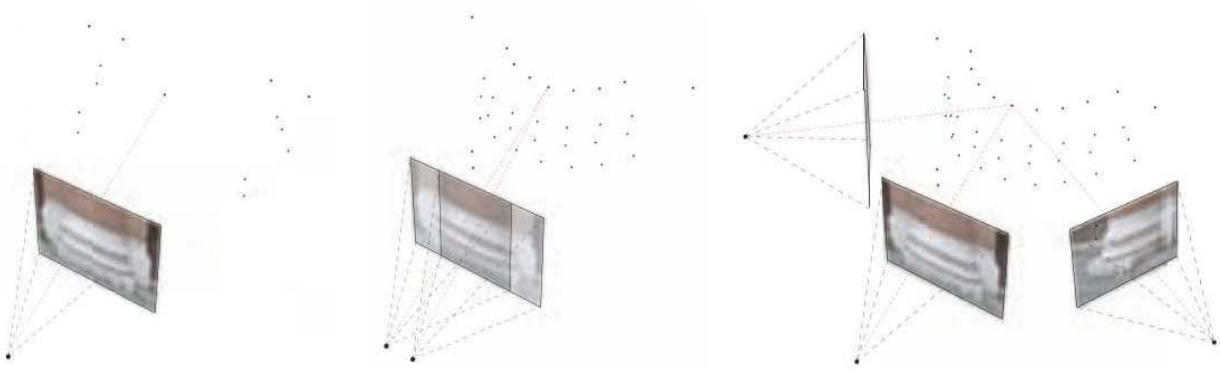


FIGURE 19 - ILLUSTRATION DES 3 TECHNIQUE DE RESTITUTION PHOTOGRAMMETRIQUE (EL KAHZA ET AL. [2010])

Les progrès techniques en matière de photographie numérique ont permis le développement des logiciels de restitution 3D, au point d'être pour certains totalement automatisés [Remondino, 2011]. [Desseiligny, 2011] décrit les principaux avantages techniques de la photographie numérique par rapport à l'argentique :

- Plus d'information
- Moins de bruit
- Moins d'effort
- Coût faible d'une photographie
- Quantité de photos quasiment infinie

→ Redondance d'information facilement accessible et quasiment gratuite

Nous avons donc vu apparaitre depuis quelques années de nombreux logiciels ou services web de restitution 3D par photogrammétrie, dont certains sont totalement gratuits et automatiques : nous pouvons citer *Photosynth* (Microsoft), *Photo Scene Editor* (Autodesk), *Arc3D* ou encore *OMS-Bundler*.

1.3 LA MODELISATION 3D

1.3.1 PRINCIPE

La représentation 3D est un outil de restitution toujours plus présent dans le domaine scientifique comme dans celui de la communication en général. Elle n'est pas encore considérée comme une

solution par défaut, du fait de l'écart encore important entre la rapidité des progrès techniques et les moyens de stockage informatique [Remondino, 2011]. Mais visuellement très convaincante [@Archeostudio, 2011], la visualisation 3D est de plus en plus familière pour le grand public. Le modèle 3D permet d'avoir sous les yeux une multitude d'informations structurées et de mettre en évidence leurs liens. Utile à l'archivage, la restitution, la manipulation et l'analyse des informations archéologiques, la modélisation, appelée également « réalité virtuelle », émerge progressivement dans le domaine archéologique [Borderie et Subsol, 2010]. A partir de données laser, les nuages de points 3D subissent toute une chaine de traitements : filtrages, maillages, modélisations et texturages [Remondino, 2011]. Suivant les étapes de traitements, les logiciels trouvent leurs avantages et leurs limites. Pour le traitement de nuages bruts et le maillage, nous pouvons citer *Trimble RealWorks*, *3D Reshaper* ou encore *Meshlab*, qui est un logiciel mis a disposition par un groupe de recherche de l'ISTI (*Instituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione*) et du CNR (Centre National de Recherche, en italien : *Consiglio Nazionale delle Ricerche*). La modélisation en elle-même peut s'effectuer avec les logiciels cités, mais aussi avec le logiciel *Google SketchUp*, disponible en version gratuite [@Sketchup.google]. Destiné en premier lieu au design et à la conception de modèles 3D, il est possible d'importer des maillages et de les travailler manuellement. Il n'existe pas de commande spécifique à la modélisation mais le cadre de notre étude étant particulier, il est intéressant de regarder dans cette direction. En effet, le levé laser du site s'étend sur plusieurs mois, et en fonction de la saison et de l'avancement des aménagements prévus pour la mise en valeur du site, la topographie du terrain ne cesse d'évoluer. La végétation se densifie au fur et à mesure du projet, et les terrassements bouleversent le niveau du sol. Le recollement des secteurs sur le maillage est donc délicat et il est indispensable d'agir manuellement pour éviter les discontinuités. Il est également difficile de filtrer automatiquement la végétation, et il est nécessaire d'interpréter la signification des points du nuage ne pas éliminer de données essentielles et rester fidèle à la réalité du site. *Google SketchUp* permet créer des applications précises en ajoutant des plugins, disponibles sur le net, ou en les développant via une console de script Ruby [@Sketchucation, @Rubylibrarydepot]. Ainsi, il est possible d'adapter les outils, d'en créer et de les combiner, pour obtenir un résultat optimal.

1.3.2 *GOOGLE SKETCHUP*

Google Sketchup bénéficie d'une très grande communauté d'utilisateurs, à l'international, et les sites consacrés à ce logiciel ne manquent pas. Beaucoup de questions trouvent réponse dans des sites web, où l'on peut visualiser des discussions à thèmes, des tutoriels, et télécharger des plugins réalisés par d'autres utilisateurs. Parmi ces sites, on retrouve SketchUcation [@scketchucation], dont les membres ont accès à une banque de plugins réalisés par d'autres membres. Nous pouvons d'ailleurs retrouver certain de ces plugins sur d'autres sites internet, comme celui hébergé par le Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie (CRAI), de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, qui rassemble de nombreux outils réalisés par les développeurs de la communauté Sketchup-Ruby depuis 2004 [@rhin.crai.archi, 2011]. Le Tableau 3 récapitule les principaux avantages du logiciel *Google Sketchup* dans le cadre de notre étude.

Avantages	Inconvénients
Version gratuite disponible	Problèmes de texturage
Fluidité de navigation	Ne supporte pas le système Lambert zone I
Banque de plugins conséquente	Ne supporte pas la texture importée
Communauté importante	
Evolution constante	

TABLEAU 3 - AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'UTILISATION DE GOOGLE SKETCHUP POUR LA MODELISATION

2 ACQUISITION ET TRAITEMENTS NUMERIQUES

Ce chapitre présente les grandes étapes d'acquisition des données 3D et leurs traitements pour parvenir à la modélisation du site archéologique. Nous détaillerons certains modes opératoires et tenterons d'apporter un regard critique quant à l'utilisation et la pertinence de ces procédés.

SOMMAIRE

2.1 Acquisition des données 3D 22
2.1.1 Lasergrammétrie terrestre 23
2.1.2 Photogrammétrie 24
2.2 Traitements numériques des points 3D 28
2.2.1 Nettoyage et segmentation des points 3D 28
2.2.2 Maillages des points 3D 31
2.3 Modélisation 3D 32
2.3.1 Correction des maillages 32
2.3.2 Création des raccords 33

2.1 ACQUISITION DES DONNEES 3D

2.1.1 LASERGRAMMETRIE TERRESTRE

Les acquisitions laser ont été réalisées avec le scanner laser TRIMBLE GX, doté d'un système d'acquisition à temps de vol (la fiche technique est jointe en annexe B, page 3). Une première campagne effectuée en 2009 a permis d'obtenir un ensemble de nuages recouvrant les ¾ de la surface étudiée, essentiellement sur le centre du site, au niveau des secteurs 5 et 6 (cf. Figure 4, page 2), au sommet du site.

Ce nuage (Figure 20) nous permet déjà de voir la topographie générale du terrain, mais dans le cadre de la valorisation du site, certaines fouilles ont modifié le terrain et d'autres zones ont été élaguées, laissant apparaitre des vestiges cachés.

FIGURE 20 - NUAGE DE POINTS ISSU DES 1ERES CAMPAGNES D'ACQUISITION EN 2009

Afin donc de densifier le nuage global, de mettre à jour certains éléments et d'étendre la zone d'étude au-delà des secteurs prédéfinis par M. Ehretsmann, plusieurs autres missions d'acquisition ont été réalisées au cours de ce projet, aux mois de février, mars et avril 2011.

La topographie du terrain relativement contraignante, ajoutée à certaines caractéristiques du scanner désavantageuses dans notre cas, nous ont obligé à effectuer de nombreuses stations qui, bien que relativement proches l'une de l'autre, n'ont pas permis de scanner certains éléments. Le schéma ci-dessous récapitule les contraintes les plus gênantes:

Contraintes	Conséquences
Pente forte du terrain Rotation vertical faible (60°)	→ Zone de balayage réduite
Terrain escarpé Volume et poids du scanner élevés	→ Zones d'accès limitées
Végétation dense et envahissante	→ Obstacle au balayage laser Certains éléments de construction invisibles

La caractéristique technique de géoréférencement direct du scanner laser nous a permis d'obtenir un nuage directement référencé, évitant ainsi une étape de consolidation ultérieure. La consolidation consiste à rassembler les nuages de chaque station en un seul, et donc de les orienter les uns par rapport aux autres. Mais dans notre cas, ils sont déjà orientés dans le système de coordonnées Lambert zone I, grâce à des point de référence. Nous nous sommes appuyés sur les points de canevas mis en place par le géomètre expert M. Ortlieb, et certains points supplémentaires ont été créés lors de la

première campagne d'acquisition en 2009. Mais la localisation de ces points a mis en évidence une contrainte supplémentaire : beaucoup d'entre eux ont disparu lors des fouilles et terrassements du terrain.

L'utilisation de la lasergrammétrie terrestre nous a donc permis d'obtenir la quasi-totalité du site en points 3D, mais certaines zones n'ont pas pu être acquises à cause des contraintes évoquées ci-dessus. Nous avons alors utilisé la photogrammétrie pour obtenir des points 3D complémentaires.

Prenons l'exemple des vestiges situés devant l' « Œil de la Sorcière » qui nous ont posé problème du fait de leur exiguïté. En effet le scanner n'a pas assez de recul pour balayer cette zone (Figure 21).

FIGURE 21 - ZONE DE DIFFICULTE POUR L'UTILISATION DU SCANNER LASER

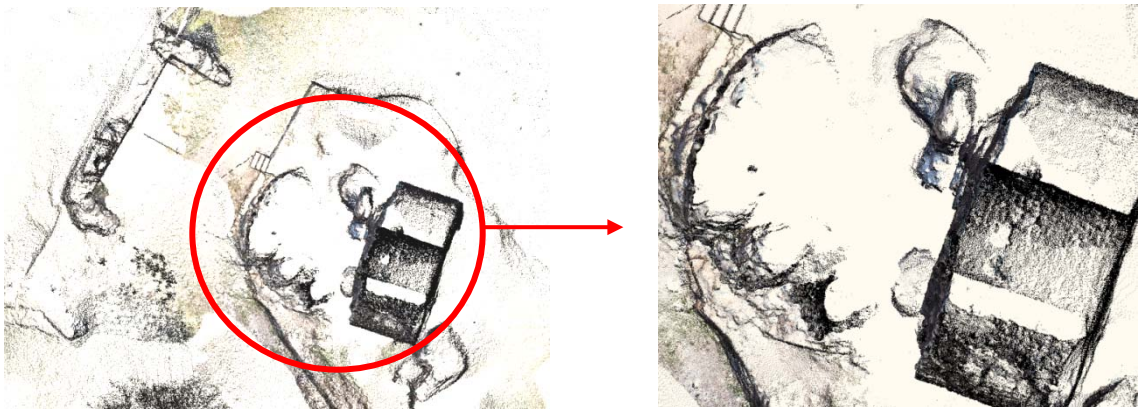


FIGURE 22 - ZONE DIFFICILE D'ACCES, SANS POINTS 3D

2.1.2 PHOTOGRAMMETRIE

Comme nous avons pu le voir dans l'étude bibliographique (cf. 1.2.2, page 17), il existe aujourd'hui de nombreux logiciels et services web permettant d'extraire automatiquement des points 3D à partir de photographies.

Nous avons effectué deux campagnes de photographies avec les appareils photos numériques reflex LUMIX DMG-GF1-W et CANON EOS-5D et avons testé 4 outils d'extraction de points parmi ceux existants, et dont le Tableau 4 récapitule certaines caractéristiques.

Nom	Développeurs	Type d'outil	Orientation absolue	Produit	Visualisation	Récupération de fichier	Gratuit
Arc 3D	**VISIC groups of K.U.Leuven**	**service web**	**Non**	**-Paramètres caméra -Modèle 3D texturé (*.obj)**	**-WebGL -Logiciel *.obj**	**Par mail**	**Oui**
Photo Scene Editor	**Autodesk**	**Service web**	**Oui**	**-Maillage -Nuage de points colorisés**	**Sur l'interface**	**Par export *.dwg, *.obj**	**Non**
Photosynth	**Microsoft**	**Service web**	**Géolocalisation**	**-Nuage de points colorisés -Photographie orientées (en relatif)**	**Sur le site**	**Non**	**Oui**
OSM Bundler	**Project Home**	**Logiciel gratuit**	**Non**	**-Nuage de points colorisés**	**Dans le fichier de sortie**	**Dans le fichier de sortie**	**Oui**

TABLEAU 4 - COMPARATIF D'OUTILS D'EXTRACTION DE POINTS 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE

Les meilleurs résultats en termes de densité et de répartition des points furent dans notre cas ceux du service web *Photosynth*. Nous avons donc choisi de compléter nos nuages de points avec cet outil, notamment pour l'exemple vu ci-dessus.

La difficulté pour obtenir un nuage de points satisfaisant réside dans le choix des prises de vue, le nombre de photographies, et le recouvrement, puisque le reste des opérations est interne au logiciel.

Les prises de vue respectent certaines règles pour que le logiciel puisse détecter les points homologues. La Figure 23 ci-dessous illustre les prises de vue photographiques pour l'ensemble de la zone ainsi que pour chaque objet (par exemple l'objet en rouge sur la figure de droite).

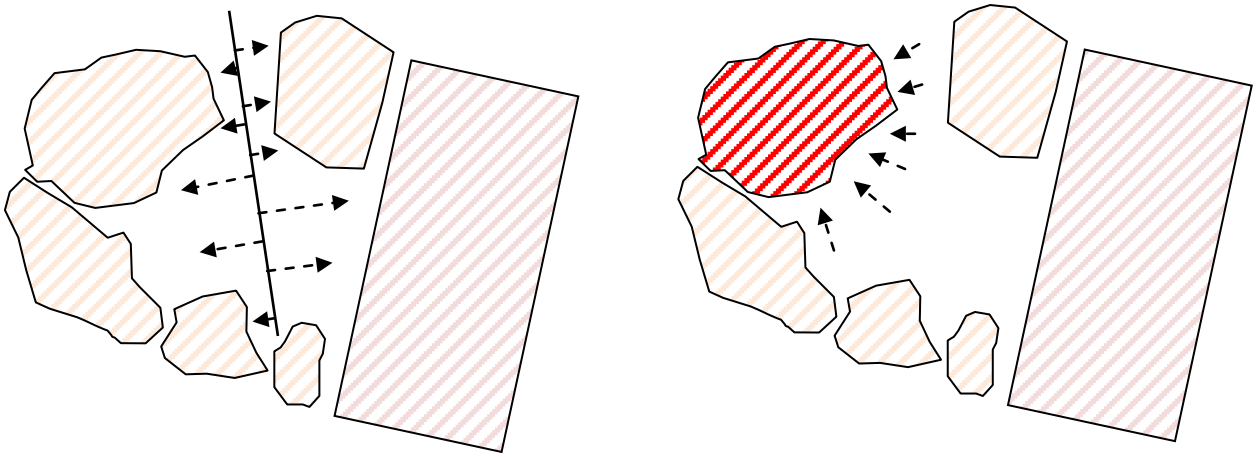


FIGURE 23 - PRISES DE VUE DES ELEMENTS DE LA ZONE

Le nuage de points obtenu via *Photosynth* est présenté sur la Figure 24, et peut être exporté pour être traité, tout comme les nuages de points acquis par lasergrammétrie terrestre.

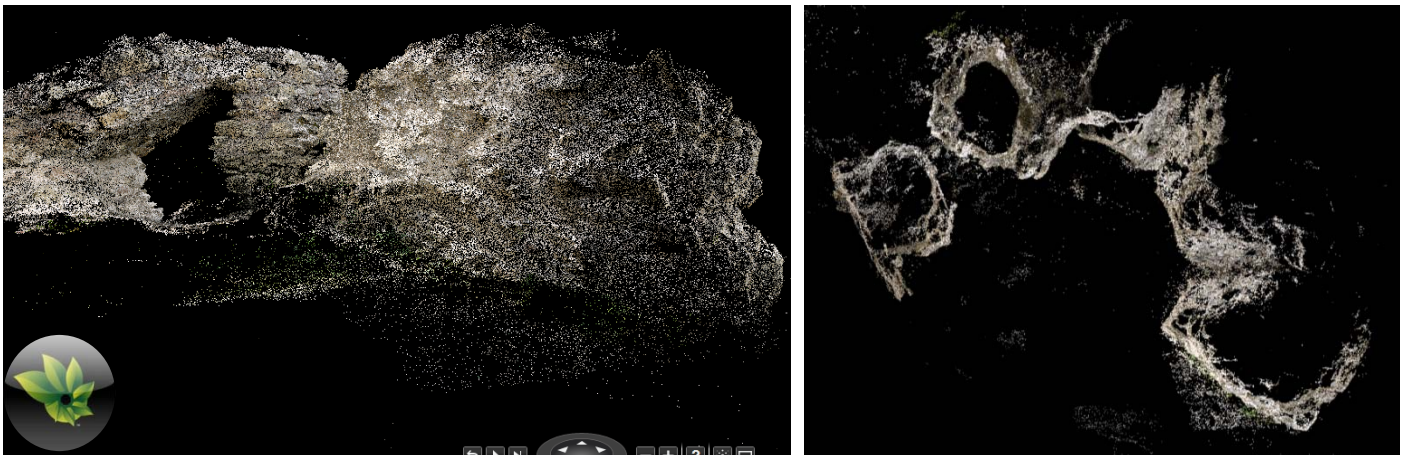


FIGURE 24 - NUAGE EXTRAIT PAR PHOTOSYNTH (VUE DE FACE A GAUCHE ET EN PLAN A DROITE)

Plusieurs essais ont été nécessaires pur obtenir satisfaction, et ceci ont mis en évidence certaines erreurs possibles lors des prises de vue :

1. Distorsions optiques minimales

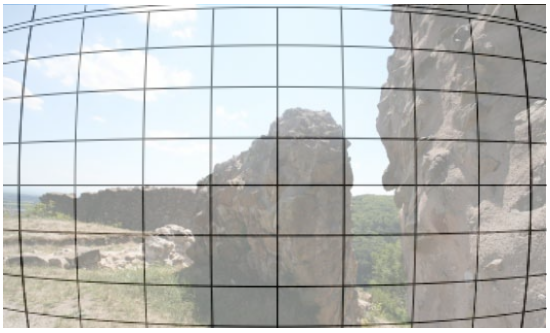


FIGURE 25 - SCHEMA D'UNE DISTORSION « EN BARILLET » DUE A UN OBJECTIF GRAND ANGLE (ICI 20MM)

2. Rapport base/éloignement optimal

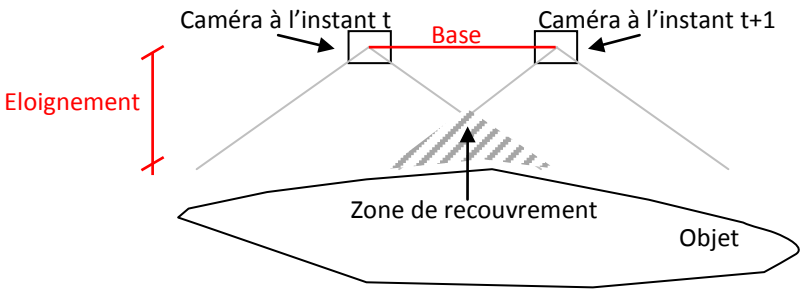


FIGURE 26 - SCHEMA VUE EN PLAN DE DEUX PRISES DE VUES SUCCESSIVES

Cas normal (axe des caméras parallèle): B = E/5
Convergence des axes des caméras : B ϵ [1/15 ; 1/10]

3. Orientation de la caméra idéalement perpendiculaire au plan tangent à l'objet photographié

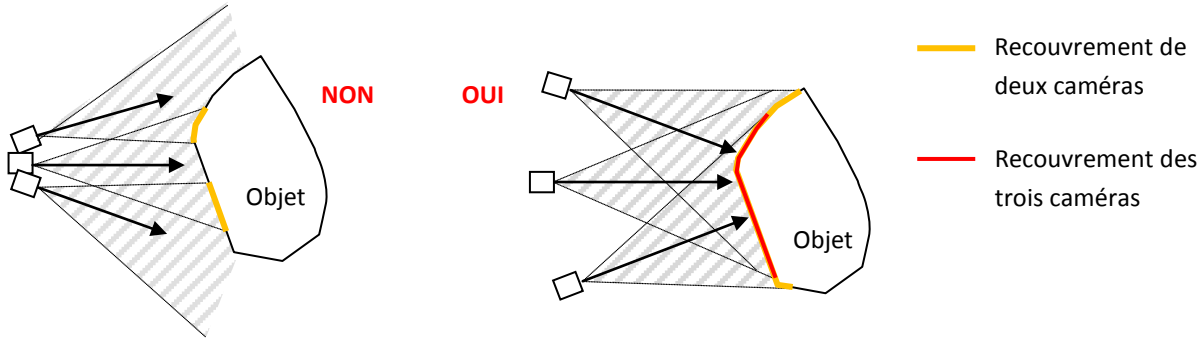


FIGURE 27 - SCHEMA DE L'ORIENTATION DE LA CAMERA SUR L'OBJET A PHOTOGRAPHIER – VUE EN PLAN OU BIEN DE COTE

4. Echelle de l'objet sur l'image sensiblement constant (pas de zoom sur une partie de l'objet)

5. Luminosité constante, diffuse, et sans trop de contraste sur la photographie

FIGURE 28 - DIFFERENCE DE LUMINOSITE PERTURBANT LA DETECTION DE POINTS HOMOLOGUES

FIGURE 29 - PHOTOGRAPHIE PRESENTANT UN FORT CONTRASTE DE LUMINOSITE

Contrairement au scanner TRIMBLE GX qui permet un géoréférencement direct, le nuage de points exporté de *Photosynth* est orienté dans un repère arbitraire, et il faut donc le consolider avec les autres nuages, via des points de références. Nous avons pour cela repéré des points communs aux nuages acquis par lasergrammétrie et par photogrammétrie, et opéré des transformations de mise à l'échelle, rotation et translation des nuages extraits via *Photosynth*.

2.2 TRAITEMENTS NUMERIQUES DES POINTS 3D

La Figure 30 récapitule les grandes étapes de traitements numériques effectués sur les points 3D ainsi que les logiciels utilisés :

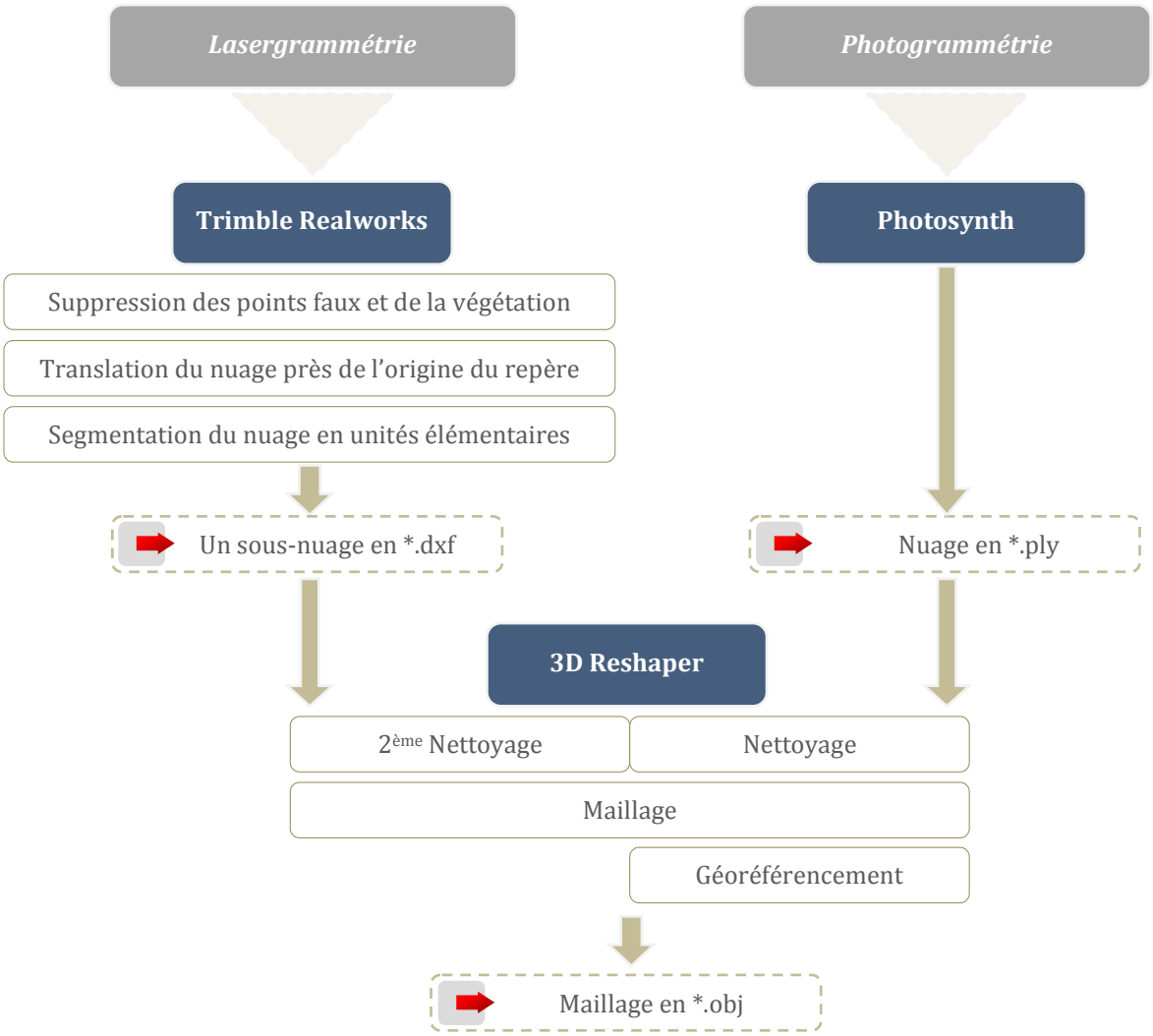


FIGURE 30 - SCHEMA DES TRAITEMENTS NUMERIQUES EFFECTUES SUR LES POINTS 3D

2.2.1 NETTOYAGE ET SEGMENTATION DES POINTS 3D

Chaque campagne d'acquisition donne lieu à un nuage de points 3D géoréférencé, et il est possible de les regrouper en un nuage global, pour avoir la totalité des points dans le même environnement. Cependant la topographie du terrain ayant été bouleversée au cours de ce projet, du fait des fouilles, des aménagements et de la végétation changeante, certains points enregistrés ne sont plus d'actualité et les zones de recouvrement auraient été difficilement traitables, comme la Figure 31 peut l'illustrer.

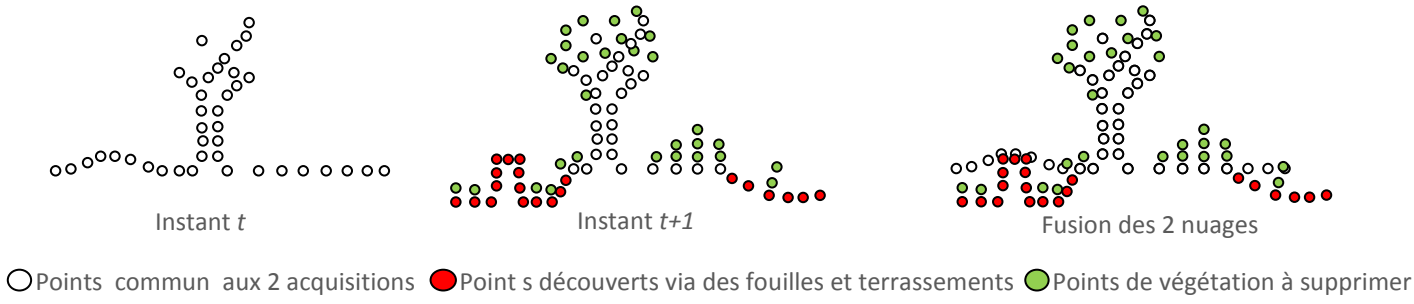

Instant t
Instant t+1
Fusion des 2 nuages
Points commun aux 2 acquisitions
Point s découverts via des fouilles et terrassements
Points de végétation à supprimer

FIGURE 31 - SCHEMA D'UNE ZONE DE RECOUVREMENT ENTRE 2 CAMPAGNES D'ACQUISITION ESPACEES DANS LE TEMPS

Pour cela nous avons choisi de travailler sur chaque nuage indépendamment des autres.

Le nettoyage des points constitue une part importante du traitement numérique, en raison de la forte densité de végétation sur le site.

FIGURE 32 - EXTRAIT D'UN NUAGE DE POINT AVANT ET APRES NETTOYAGE DE LA VEGETATION

Nous avons pu utiliser pour les zones relativement planes, l'outil d'échantillonnage topographique du logiciel *Trimble Realworks*. Il permet de supprimer certains points isolés du reste du nuage en fonction de la distance entre les points. Les paramètres de cet outil sont cependant difficilement quantifiables et l'échantillonnage s'effectue donc visuellement, grâce au mode de prévisualisation des points à supprimer. De plus, lorsque le terrain est trop escarpé, nous avons préféré sélectionner et supprimer manuellement les points inutiles, grâce à l'outil de segmentation.

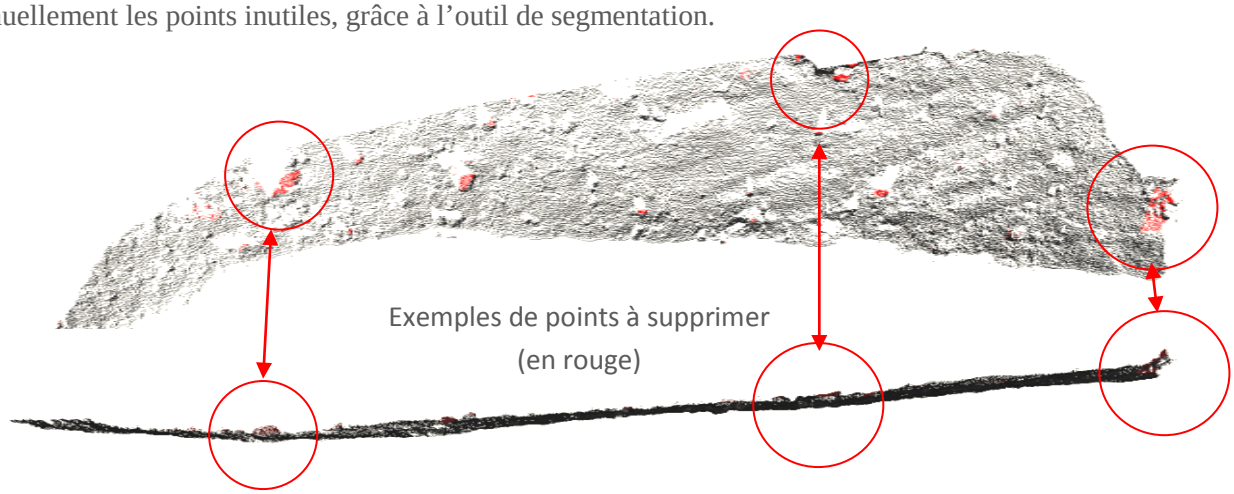


FIGURE 33 - VUE EN PLAN ET EN COUPE DE L'ECHANTILLONNAGE TOPOGRAPHIQUE D'UN TALUS

Après avoir nettoyé le nuage, nous avons choisi de le segmenter en « objets élémentaires », c'est-à-dire en sous nuages représentant chacun un élément unitaire (mur, rocher, etc.). Ils seront traités par la

suite de manière indépendante. En considérant avoir *N* objets unitaires au total, nous définirons l'objet *i* appartenant à l'un de ces *N* objets, tel que $i \in \{1; N\}$.

Bien que le nuage soit géoréférencé, il est nécessaire pour la suite des traitements, de réduire les coordonnées du projet, pour les rapprocher de l'origine du repère. En effet les données sont enregistrées dans le système de projection Lambert Zone I, dont l'ordre de grandeur en X est de plus de 950 000m, et en Y, supérieur à 320 000m. Certains logiciels ne gèrent pas d'aussi grandes valeurs, notamment *Google Sketchup,* que nous utilisons pour la modélisation des objets du site. C'est donc une translation de -956000 en X et -323000 en Y qui est effectuée dans le logiciel *Trimble Realworks*. Cette opération peur également se faire ultérieurement, avant d'importer les données dans *Google sketchup*, notamment dans *3D Reshaper*, qui permet l'opération de translation. Mais deux raisons nous poussent à le faire dans *Realworks* :

1. La translation dans *Realworks* est réalisée sur tout le nuage, alors que dans *3D Reshaper*, nous ne traitons que des sous-nuages *i*, cela multiplie donc le nombre d'opérations.
2. En effectuant plusieurs essais avec l'outil de translation de *3D Reshaper*, nous avons constaté des erreurs de position du nuage d'environ 0.05mm au 100m, *a priori* dues à des troncatures sur les normes des vecteurs de translation, mais aucun des tests que nous avons effectué pour trouver l'erreur ne nous a permis de dégager un systématisme ou une erreur distincte.

Le logiciel *3D Reshaper* nous est utile pour affiner le nettoyage des *N* sous-nuages et pour effectuer leur maillage, les résultats étant plus satisfaisants qu'avec *Realworks*.

Malgré une bonne visualisation des points, le nettoyage s'avère parfois complexe, en raison de la très dense végétation présente entre les pierres, rendant quasiment impossible la distinction entre les deux. Il faut donc choisir dans ce cas, et de façon arbitraire, le procédé le plus efficace (par rapport au ratio *temps de travail*/*qualité du nettoyage*).

Choix 1 : Segmenter le nuage élémentaire *i* en plusieurs parties traitées les unes après les autres et regroupées ensuite (Figure 34).

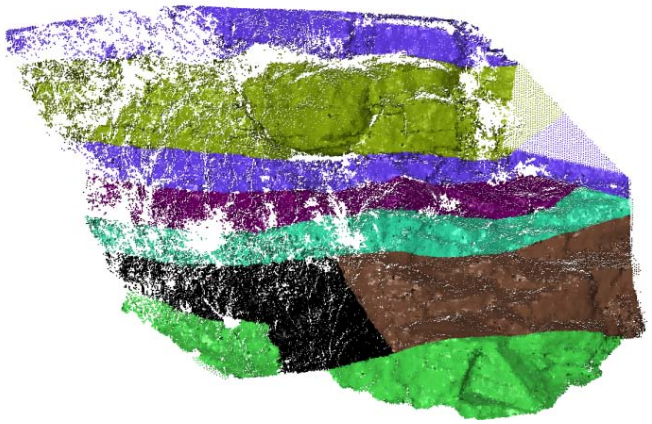


FIGURE 34 - EXEMPLE DE SEGMENTATION DE NUAGE EN SOUS-PARTIES POUR FACILITE LE NETTOYAGE

Choix 2 : Epurer la zone en supprimant la majorité des points problématiques.
Ne conserver que certains points appartenant théoriquement à l'objet (même si ce sont en réalité des points de végétation situés dans le plan de l'objet).
Mailler la zone manquante avec les quelques points restants.

Choix 3 : Définir la surface moyenne de l'objet et supprimer les points n'appartenant pas à cette surface.
Il est également nécessaire dans certains cas de combiner les méthodes afin d'arriver au meilleur résultat pour un temps de traitement optimum.

2.2.2 MAILLAGE DES POINTS 3D

Le maillage d'un nuage *i* se fait par création de triangles reliant les points 3D entre eux, en fonction notamment de leur répartition dans l'espace. L'outil de modélisation de *3D Reshaper* est automatique, mais nécessite tout de même de définir des paramètres adaptés à la géométrie de l'objet scanné. Le maillage ne doit pas contenir trop de trous, ni de pics, mais ne doit pas non plus être lissé au point de ne plus voir les irrégularités de l'objet.

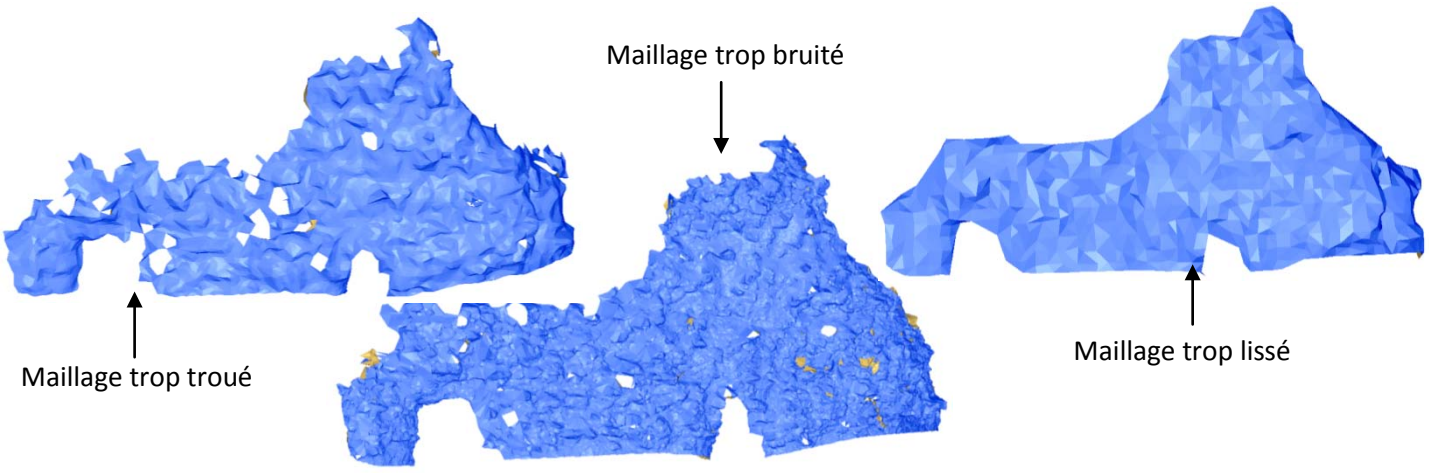


FIGURE 35 - EXEMPLES DE MAILLAGES REALISES AVEC 3 PARAMETRES DIFFERENTS

Malgré les précautions prises pour supprimer les points n'appartenant pas à l'objet maillé *i*, il subsiste ce que l'on appellera des erreurs de maillage, comme les extraits de la Figure 36 ci-dessous nous le montrent.

FIGURE 36 - ERREURS DE MAILLAGE DANS L'ENVIRONNEMENT *GOOGLE SKETCHUP*

Ces erreurs doivent être éliminées, afin de rendre la surface de l'objet continue et obtenir une unité homogène. Les nombreuses fonctionnalités de *3D Reschaper* permettent de supprimer des mailles, de boucher les trous ou encore d'éliminer les pics, mais ces outils semi-automatiques (*i.e.* nécessitant la définition de paramètres) ne nous ont pas donné satisfaction par rapport aux méthodes utilisées dans le logiciel *Google Sketchup*.

Dans ce logiciel, nous nous sommes donc arrêtés aux maillages, et avons procédé aux corrections dans *Google Skechup*.

2.3 MODELISATION 3D

Le terme modélisation est très proche de celui de maillage dans notre étude car ils sont visuellement très proches. Mais la nuance est essentiellement chronologique car le modèle 3D correspond au maillage, corrigé des erreurs de maillage dans *Google Sketchup*. Nous parlerons donc de maillage lorsqu'il s'agit d'un élément maillé encore non corrigé dans *Google Sketchup*, et de modèle lorsque cette étape est réalisée.

La Figure 37 récapitule les opérations constituant l'étape plus générale de modélisation, effectuée sur les *N* objets maillés :

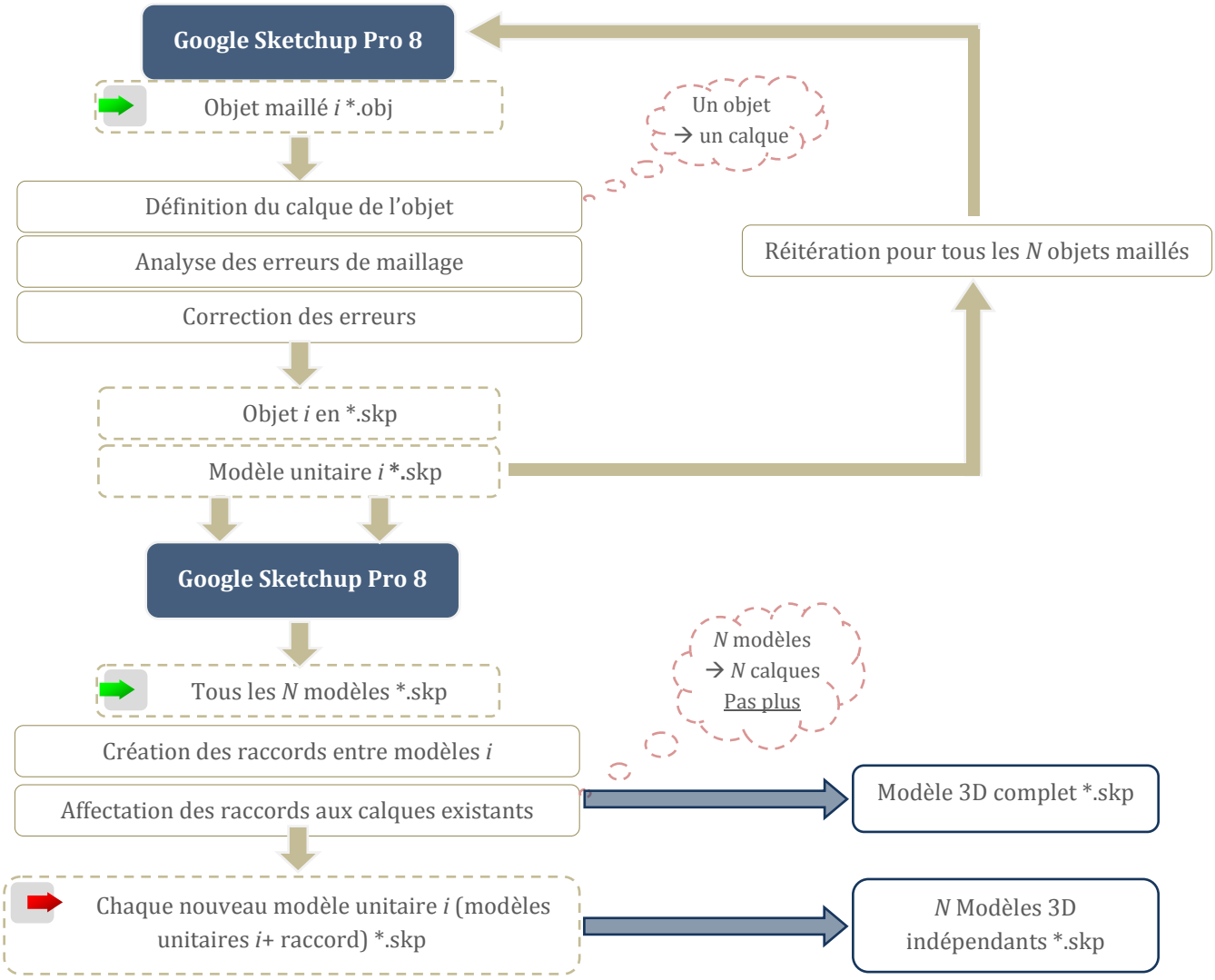

Google Sketchup Pro 8
Objet maillé *i* *.obj
Un objet
→ un calque
Définition du calque de l'objet
Analyse des erreurs de maillage
Correction des erreurs
Réitération pour tous les *N* objets maillés
Objet *i* en *.skp
Modèle unitaire *i* *.skp
Google Sketchup Pro 8
N modèles
→ *N* calques
Pas plus
Tous les *N* modèles *.skp
Création des raccords entre modèles *i*
Affectation des raccords aux calques existants
Modèle 3D complet *.skp
Chaque nouveau modèle unitaire *i* (modèles unitaires *i*+ raccord) *.skp
N Modèles 3D indépendants *.skp

FIGURE 37 - SCHEMA DES OPERATIONS DE MODELISATION DES OBJETS MAILLES

2.3.1 CORRECTION DES MAILLAGES

En théorie, l'étape de correction des maillages est l'une des plus importantes après celle de nettoyage des points, car tout comme cette dernière, elle demande un long travail d'observation de l'objet, et d'opérations manuelles et arbitraires. C'est pourquoi nous avons consacré une grande partie de cette étude à la recherche d'outils optimisant au maximum ces opérations, et nous nous sommes tournés

vers le logiciel de modélisation *Google Sketchup*. L'utilisation de ce logiciel présente de nombreux avantages concernant notre étude, (cf. 1.3.2, page 19), mais le plus intéressant pour ce chapitre est sans aucun doute sa très grande communauté de développeurs, qui nous permet de trouver rapidement des réponses à nos questions, et également de nombreux outils créés par ces utilisateurs. En annexe F, page 27, est jointe une liste des plugins que nous avons testé et utilisés pour certains dans nos travaux, et où tous les plugins mentionnés dans ce chapitre sont détaillés. Par ailleurs, nous avons rédigé une fiche descriptive des opérations de correction de maillages en annexes C et D, pages 15 et 23. Les outils importés ne sont pas spécifiquement destinés à nos travaux sur les mailles mais nous les avons adaptés à notre étude. Parfois, il s'agit même de commandes très générales comme des simples gestionnaires de calques ou des modes de sélections rapides, mais qui rendent nos manipulations plus automatiques, et plus rapides.

Nous commençons tout d'abord par importer le modèle maillé *i* et renommons le calque courant à son nom. Ensuite on effectue une analyse rapide des imperfections à corriger, grâce au plugin *Solid Inspector*, qui repère par des cercles et contours de couleurs, les trous, les superpositions incohérentes de triangles et le contour général de l'objet. Le travail de correction qui suit dépend de la complexité des imperfections, de leur étendue et du type d'objet concerné (Pour un mur d'origine, le travail sera plus minutieux que pour un talus par exemple).

Lorsque l'objet *i* est corrigé - nous parlerons alors du modèle *i* - il est sauvegardé en tant que fichier indépendant, puis intégré ultérieurement à la maquette composée des *N* objets. Créer un fichier par objet est avantageux à plusieurs titres :

- Modifications du modèle indépendamment des autres
- Plusieurs versions du modèle possibles en fonction des besoins (cf. 4.3.2, page 57)
- Fichier plus léger et navigation plus fluide

Tous les modèles *i* sont importés dans un nouveau fichier *Google Sketchup* dans lequel est assemblée la maquette finale. Mais si les modèles sont importés aux bonnes coordonnées, et à la bonne échelle, ils ne sont pas pour autant liés parfaitement les uns à côté des autres. Nous devons donc les raccorder, comblant ainsi les zones vides mais aussi supprimant les zones de superposition entre modèles.

2.3.2 CREATION DES RACCORDS

FIGURE 38 - SCHEMA EXPLICATIF DES ZONES DE RACCORDS A TRAITER

L'étape de raccord des modèles est indispensable à la finalisation de notre maquette, elle correspond à plus grande échelle à l'étape de correction des maillages, le but étant d'obtenir un ensemble unique, homogène, et complet. Nous utilisons d'ailleurs les mêmes outils que l'étape précédente (Figure 38).

Les zones à combler peuvent être plus ou moins grandes, mais n'ont pas dans tous les cas pas de points 3D sur lesquels s'appuyer autres que les contours des modèles qui les entourent. Il ne s'agit pas ici de modéliser un ensemble de points 3D acquis par mesures, mais de créer ces points, par

extrapolation des mailles existantes. Nous faisons l'hypothèse de l'existence de ces points là où ils sont créés, dans une logique de continuité du terrain et des éléments. Pour nous aider, nous utilisons entre autre le plugin *Curviloft*, un générateur de surfaces à partir de contours. Cet outil très intéressant peut s'utiliser dans beaucoup de cas, dès qu'il s'agit de créer une surface. Il a l'avantage de suivre une certaine uniformité dans la surface créée et de générer des courbes. Le calcul est très rapide et le rendu plus réaliste qu'un maillage manuel. Le Tableau 5 ci-dessous compare brièvement les deux méthodes :

Plugin *Curviloft*	Maillage manuel
Création automatique de courbes	Maillage manuel par création de triangles
Extrapolation automatique	Lignes droites uniquement
Traitement rapide	Création arbitraire de point intermédiaires
Possibilité de modification des contours de la surface	Traitement long
Pas de pic ni de trous	Risque d'erreurs de maillage, d'oublis
Rendu réaliste, harmonieux	Rendu irrégulier

TABLEAU 5 - COMPARATIF DU PLUGIN CURVILOFT ET DU MAILLAGE MANUEL

Bien d'autres outils nous ont été utiles pour traiter ces étapes avec rapidité et efficacité, les principaux sont décrits dans le tableau récapitulatif des plugins, présenté en annexes F, page 27.

Nous avons donc modélisé l'ensemble des données acquises pour créer un modèle 3D général du site, dans lequel nous souhaitons intégrer des données d'archives 2D. Nous allons aborder cette étape dans le chapitre suivant.

3 INTEGRATION DE DONNEES 2D AU MODELE 3D

Ce troisième chapitre présente les différentes étapes nécessaires à l'intégration des données d'archives 2D dans le modèle 3D. Nous détaillerons également les méthodes utilisées pour gérer et classer les données. Nous analyserons les procédés utilisés de manière critique et tenterons d'apporter des solutions adéquates.

SOMMAIRE

3.1 Analyse et gestion des données 37
3.1.1 Analyse du rapport de M. Ehretsmann : objectif a atteindre 37
3.1.2 Gestion des données numériques 38
3.2 Vectorisation des coupes archéologiques 39
3.2.1 Numérisation et description des outils de vectorisation 39
3.2.2 Découpage des données et création des coupes vectorielles 41
3.3 Géoréférencement : Contraintes et solutions 41
3.3.1 Inversion des points d'extrémité 42
3.3.2 Position des points d'extrémité 42
3.3.3 Nombre de points de références 44
3.4 Intégration des coupes à l'espace 3D et au modèle 3D 44

La Figure 39 ci-dessous résume les grandes étapes permettant l'intégration des données d'archives 2D à la maquette 3D.

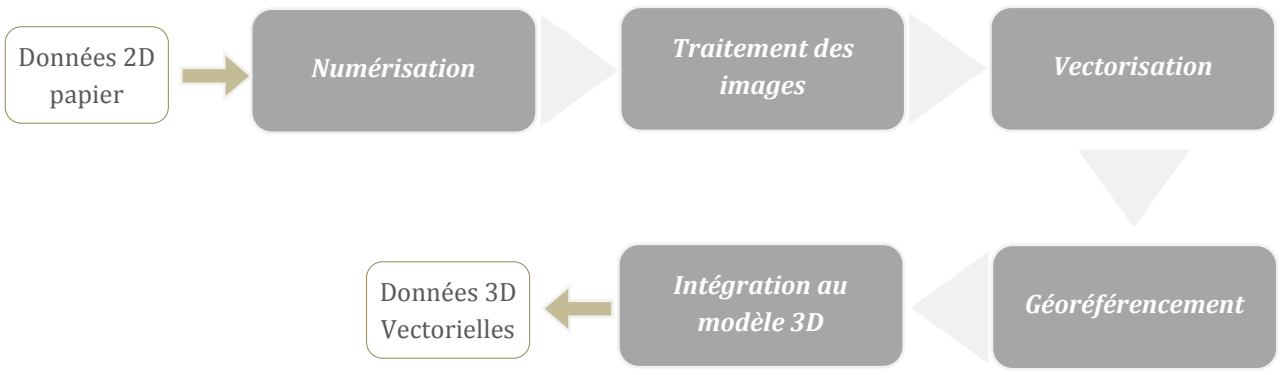


FIGURE 39 - ETAPES DE TRAITEMENTS DES DONNEES 2D

3.1 ANALYSE ET GESTION DES DONNEES

3.1.1 ANALYSE DU RAPPORT DE M. EHRETSMANN : OBJECTIF A ATTEINDRE

Les données sur lesquelles nous nous sommes appuyés sont celles de M. Ehretsmann, extraites de son rapport de fouilles de 1992. Ce document, à l'origine dactylographié, contient l'ensemble de l'étude archéologique qu'il a mené sur le site de l'Engelbourg. Différents plans thématiques nous permettent de visualiser le site dans son ensemble, la disposition des sondages (env. 15 sondages), ainsi que la décomposition du site en secteurs. Chaque sondage fait l'objet d'une analyse archéologique, comprenant entre autre sa localisation sur le site, des coupes dessinées à la main par M. Ehretsmann, la description de ces coupes et l'interprétation archéologique qu'il en a faite. Parmi toutes ces informations, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux dessins des coupes (une vingtaine au total), que nous souhaitions intégrer au modèle 3D du site. L'objectif est de pouvoir visualiser dans le modèle 3D, l'ensemble des coupes, géoréférencées et orientées. Le terme « coupe » tel qu'il est utilisé dans notre étude peut être équivoque. Il désigne d'abord le dessin 2D, réalisé manuellement par M. Ehretsmann et défini par deux points d'extrémité (cf. premier schéma de la Figure 41). Mais nous l'employons également de manière synecdochique, pour désigner l'ensemble des coupes d'un sondage, aussi bien en vertical, qu'en plan. Si un sondage peut se symboliser dans l'espace par un parallélépipède (comme une tranchée), les coupes sont ses faces (Figure 40 ci-dessous).

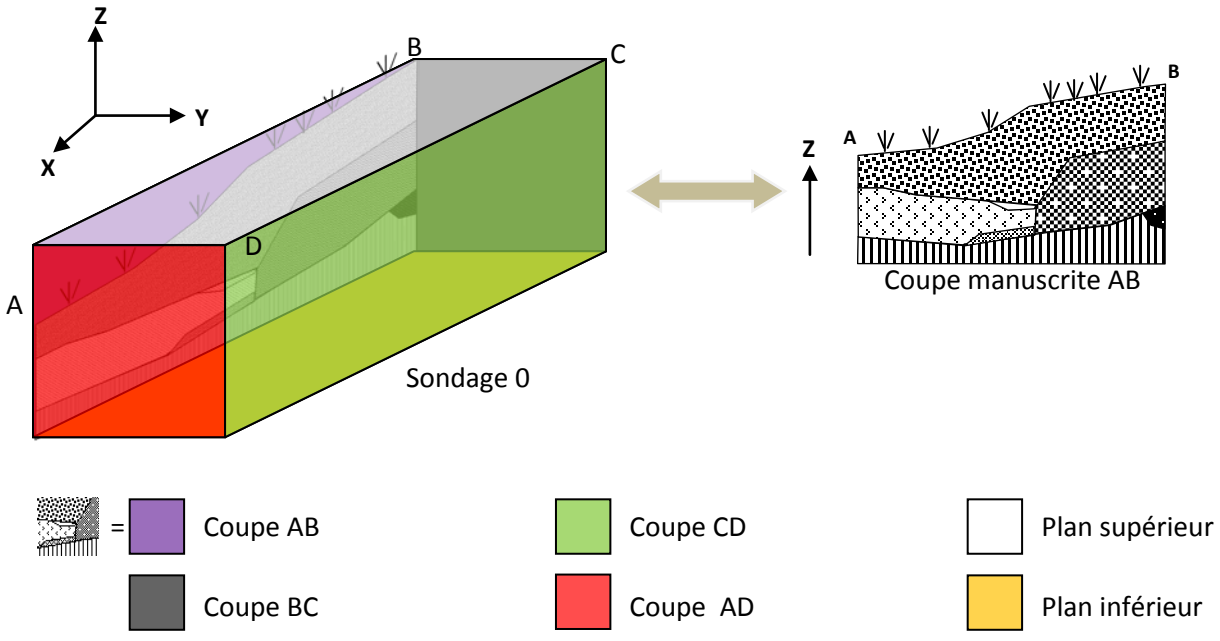


FIGURE 40 - SCHEMA D'UN SONDAGE ET D'UNE DE SES COUPES

Pour évoquer toutes les coupes du sondage 0 représenté ci-dessus, on parlera plus généralement de la coupe ABCD.

La Figure 41 détaille les différentes étapes d'intégration des coupes.

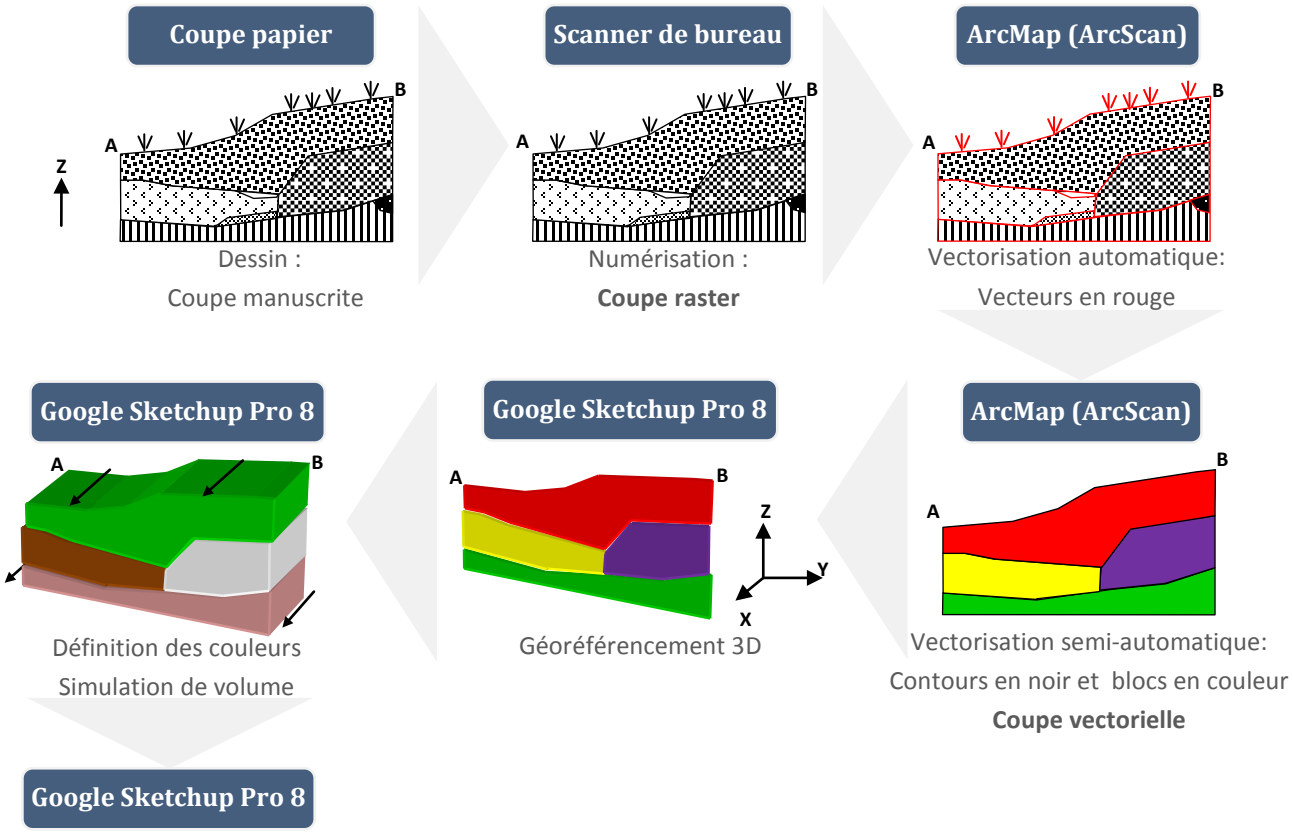


FIGURE 41 - OPERATIONS EFFECTUEES SUR UNE COUPE, DE LA NUMERISATION 2D A L'INTEGRATION A LA MAQUETTE 3D

3.1.2 GESTION DES DONNEES NUMERIQUES

Avant de mettre en place une chaîne de traitements permettant de passer de données « papier » 2D à des données vectorielles 3D, nous avons défini des règles d'appellation pour chaque type de données. Les coupes archéologiques ont donc été nommées selon une règle simple mais stricte, de même pour chaque objet unitaire de la maquette 3D. Ces règles sont décrites ci-dessous.

Nous avons considéré, de façon arbitraire, qu'un objet unitaire se définit par :

- Le secteur auquel il appartient → S1 à S6
- Le type d'objet il représente → Talus, Plateforme, Chemin, Rocher, Mur, Ouverture
- Sa localisation dans le secteur → N, S, E, O, NE, NO, SE, SO
- Un numéro identifiant au cas où plusieurs données auraient les mêmes caractéristiques décrites ci-dessus → A partir de 1

Nous avons également considéré qu'une coupe archéologique s'identifie par :

- Le secteur auquel elle appartient → S1 à S6
- Le sondage auquel elle appartient → A partir de 1
- Le nom des points d'extrémité qu'elle comporte → A, B, C, etc.

Le schéma joint en annexe H page 32 détaille le fonctionnement de ces règles.

Les principaux avantages de choisir des normes générales sont les suivants :

- Rapidité de compréhension du contenu de la donnée
- Facilité de recherche d'une donnée particulière
- Limitation des risques de données mal classées, égarées ou dont le nom est équivoque

3.2 VECTORISATION DES COUPES ARCHEOLOGIQUES

Les étapes de vectorisation sont détaillées dans l'annexe I, page 33.

3.2.1 NUMERISATION ET DESCRIPTION DES OUTILS DE VECTORISATION

La première étape consiste à récupérer sur informatique le rapport de M. Ehretsmann pour le traiter. Nous l'avons donc numérisé et conservé sous format *.pdf.

VECTORISATION AUTOMATIQUE

Nous avons réduit ensuite les couleurs de l'image raster à 2 couleurs, noir et blanc, pour pouvoir utiliser l'outil de vectorisation automatique de l'extension *ArcScan*, de la suite logicielle *ArcGIS*, qui ne fonctionne pas sur des images multicolores. Sur une image noir et blanc, il affecte aux pixels noirs des vecteurs, et aux pixels blancs, rien. Ainsi, tous les éléments noirs de l'image seront vectorisés. La Figure 42 ci-dessous représente une image raster constituée de pixels blancs et noirs. Lors de la vectorisation automatique, les vecteurs (ici en rouge) sont créés sur les pixels noirs. Le reste de l'image ne contient pas d'informations vectorielles.

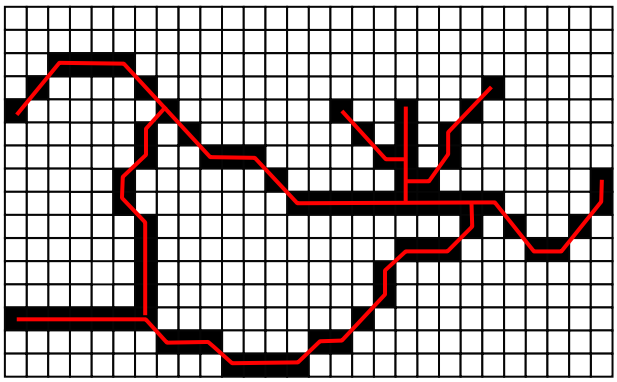


FIGURE 42 - SCHEMA D'UNE IMAGE RASTER VECTORISEE AUTOMATIQUEMENT

Cette étape de vectorisation « intégrale » de la coupe est nécessaire même si tous les éléments vectorisés ne nous intéressent pas. Les vecteurs (en rouge) constituent une base pour créer ensuite les vecteurs que nous désirons intégrer à la maquette, et nous les appellerons les vecteurs supports.

Dans notre étude, les vecteurs qu'il nous est utile d'extraire dans une coupe sont :

- Le contour de fouille de la coupe
- Le niveau de la roche, porteuse des fondations
- Le niveau du sol
- Les contours des strates principales

Mais nous avons également besoin des surfaces intérieures des contours des strates, dans l'optique d'y affecter des textures et/ou des informations. Ces surfaces sont définies par des polygones fermés, dont l'intérieur contient des informations vectorielles.

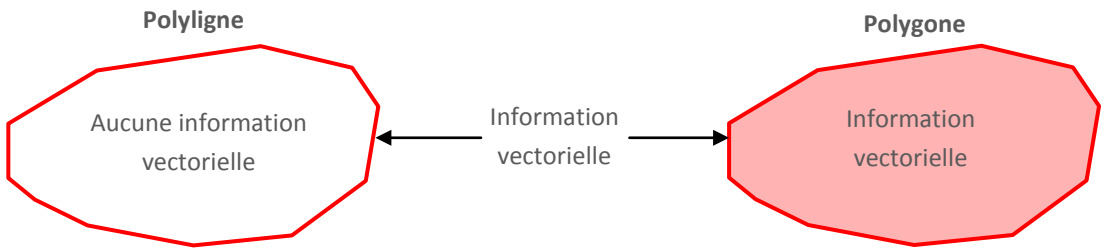


FIGURE 43 - INFORMATIONS VECTORIELLES POUR UNE POLYLIGNE ET UN POLYGONE

Nous avons donc décidé de créer deux types de données intégrables à la maquette 3D :

- Les vecteurs « contours », composés de polylignes et représentant le ou les contours de fouille
- Les vecteurs « blocs » composés de polygones et représentant les strates

Pour créer ces vecteurs, nous utilisons la commande de vectorisation semi-automatique

VECTORISATION SEMI-AUTOMATIQUE

Cette commande permet d'accrocher automatiquement les vecteurs supports qui nous intéressent et construire par-dessus, comme sur une couche de données, le contour et les blocs à intégrer à la maquette.

Nous avons utilisé le logiciel *ArcCatalog* pour créer ces couches vierges, appelés « fichiers de formes », dans lesquelles nous avons ensuite construit les vecteurs. Chaque fichier de forme contient le nom de la couche de données, le type d'entités qu'elle contient (points, polylignes, polygones, etc.) et le système de coordonnées. Ce dernier n'est d'ailleurs pas nécessaire dans notre cas puisque nous travaillons avec des données 2D.

ArcCatalog est une application de la suite *ArcGIS*, tout comme *ArcMap* qui permet de créer et gérer un catalogue de données cartographiques et leurs connexions à des serveurs. Il est possible d'accéder au catalogue depuis l'interface *d'ArcMap*. Nous avons donc créé dans *ArcCatalog*, deux fichiers de formes, un de type polylignes pour le contour de fouille, et l'autre de type polygones pour les blocs des strates.

Depuis la barre d'outils *d'ArcScan*, nous avons généré dans leur fichier de formes respectif, le contour de fouille et les blocs de strates. Sur la Figure 44, nous pouvons voir l'image raster, les blocs de strates ainsi que le contour de fouille de la coupe S1_S1_AB.

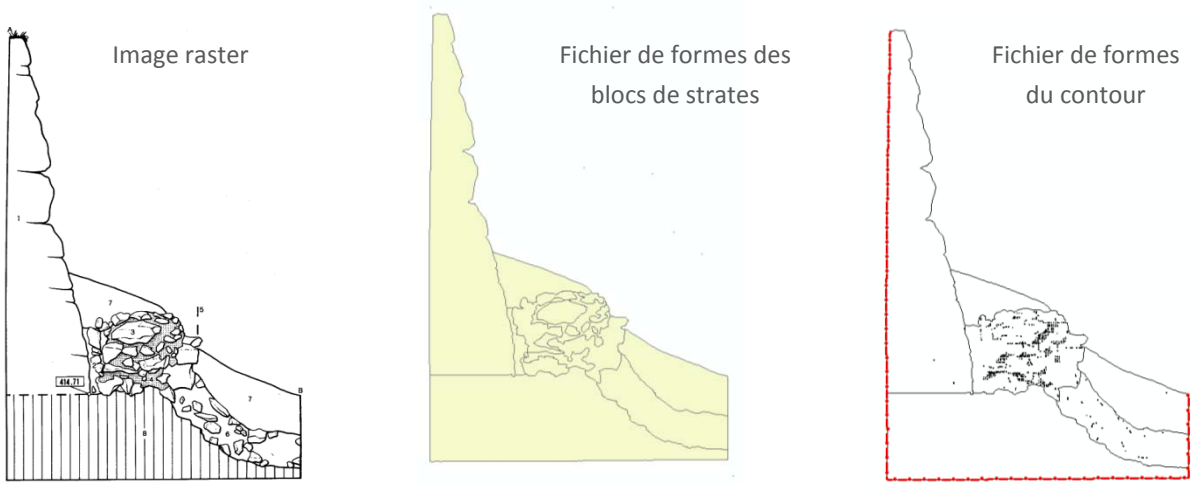


FIGURE 44 - VECTORISATION DE LA COUPE S1_S1_AB PAR CREATION DES BLOCS DE STRATES ET DU CONTOUR DE FOUILLE

3.2.2 DECOUPAGE DES DONNEES ET CREATION DES COUPES VECTORIELLES

Comme nous avons pu le préciser dans le paragraphe précédent, l'ensemble des vecteurs créés automatiquement ne nous est pas utile. En effet, les dessins de coupes de M. Ehretsmann contiennent de nombreux détails, autres que les simples contours des strates : de la végétation, des hachurages, des annotations particulières, des effets de relief, etc. D'autre part, M. Ehretsmann a délimité les strates du sous-sol avec beaucoup de précision, ce qui entraine parfois un nombre de strates – et donc de vecteurs à créer – très élevé. Mais d'après les principes de découpage actuellement appliqués par les archéologues, un tel niveau de détail n'est pas nécessaire, la composition de certaines strates n'apportant pas d'informations essentielles. Pour bien comprendre la lecture des coupes et en dégager les éléments essentiels à vectoriser, nous avons étudié chaque coupe au cas par cas avec l'archéologue M. Koch.

La Figure 45 ci-dessous illustre la problématique des vecteurs superflus et des regroupements de strates. Sur la figure en noir et blanc, tous les pixels noirs sont vectorisés (à l'issue de la vectorisation automatique), y compris les hachurages et les herbes. Sur la figure de droite, seuls les contours jugés intéressants par M. Koch sont vectorisés.

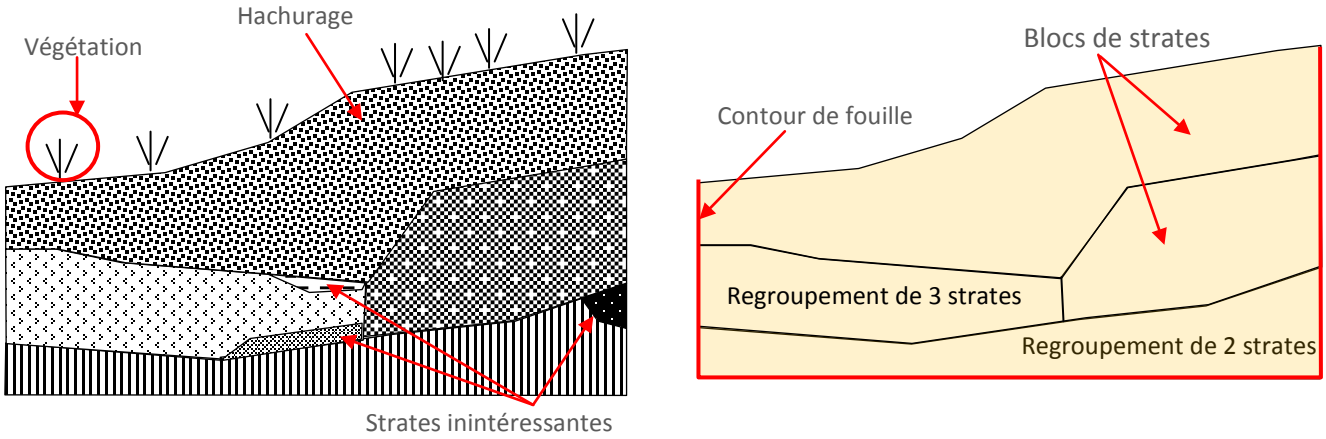


FIGURE 45 - EXEMPLE DE REGROUPEMENTS DE STRATES POUR LA CREATION DES BLOCS

Toutes les coupes du rapport de M. Ehretsmann ont ainsi été analysées, délimitées, vectorisées et exportées en *.dxf via *ArcCatalog*.

3.3 GEOREFERENCEMENT : CONTRAINTES ET SOLUTIONS

Dans l'intégration des coupes 2D, cette étape fut la plus complexe à mettre en place car beaucoup de questions se sont posées autour de la précision des données de départ et la chaîne de traitements la plus rapide.

Pour intégrer les coupes vectorielles au modèle 3D, nous avons commencé par les géoréférencer dans l'espace 3D. Nous disposions pour cela de points de référence correspondant aux points d'extrémité des coupes, que le géomètre expert chargé du levé du site, M. Ortlieb, a reportés sur un plan *AutoCAD* (*.dwg).

3.3.1 INVERSION DES POINTS D'EXTREMITE

La première difficulté apparut lorsque nous avons constaté quelques incohérences entre les noms des points d'extrémité des coupes, qui sont parfois inversés entre le plan et la coupe. Nous avons repéré ces erreurs grâce à la différence d'altitude théorique entre les extrémités. Sur la Figure 46 ci-dessous, nous pouvons voir, à gauche, une perspective de 2 coupes voisines, dont le point B est commun, et à droite, les 2 coupes sur le plan du géomètre.

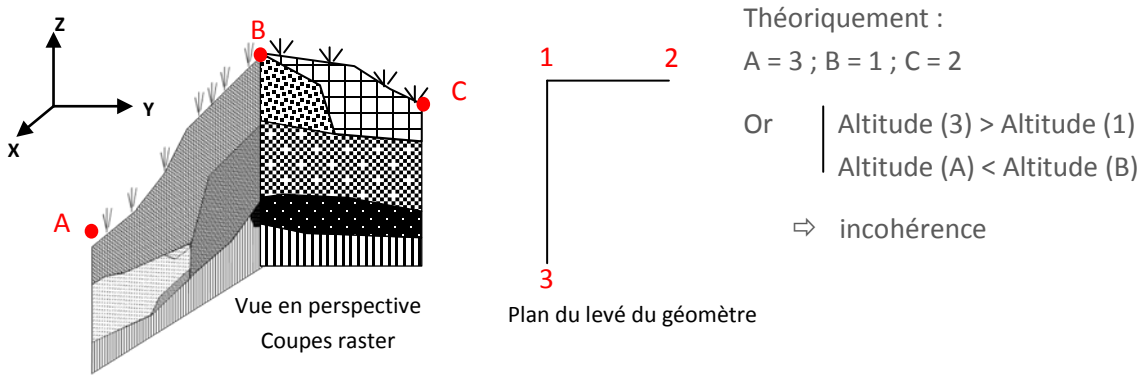


FIGURE 46 - INCOHERENCE DE CERTAINS NOMS DE POINTS D'EXTREMITE

Nous avons estimé le levé du géomètre comme sûr et privilégié ses données, d'autant que la connaissance du terrain allait dans son sens (sens de la pente logique dans le cas du géomètre). Il nous a fallu étudier l'ensemble des coupes pour vérifier et corriger d'éventuelles erreurs de ce type.

3.3.2 POSITION DES POINTS D'EXTREMITE

Nous avons ensuite constaté une incertitude non négligeable sur la position des points de référence, entre les coupes de M. Ehretsmann et le plan de M. Ortlieb. Dans le cas idéal, les extrémités des coupes correspondraient exactement aux points levés par le géomètre, et sur deux coupes ayant une arrête commune, le point d'extrémité commun serait unique (par exemple, les points B et 1 de la Figure 46 ci-dessus devraient avoir les mêmes coordonnées). En partant de cette hypothèse nous constatons que certaines correspondances sont impossibles, au risque de déformer significativement la géométrie de la coupe, et de créer des aberrations, telles que la non-verticalité d'une coupe (alors qu'une coupe est par définition verticale). La Figure 47 montre les zones d'incertitude sur la position effective des points d'extrémité, et la déformation que certaines doivent subir pour faire coïncider les points d'extrémité avec les points du plan.

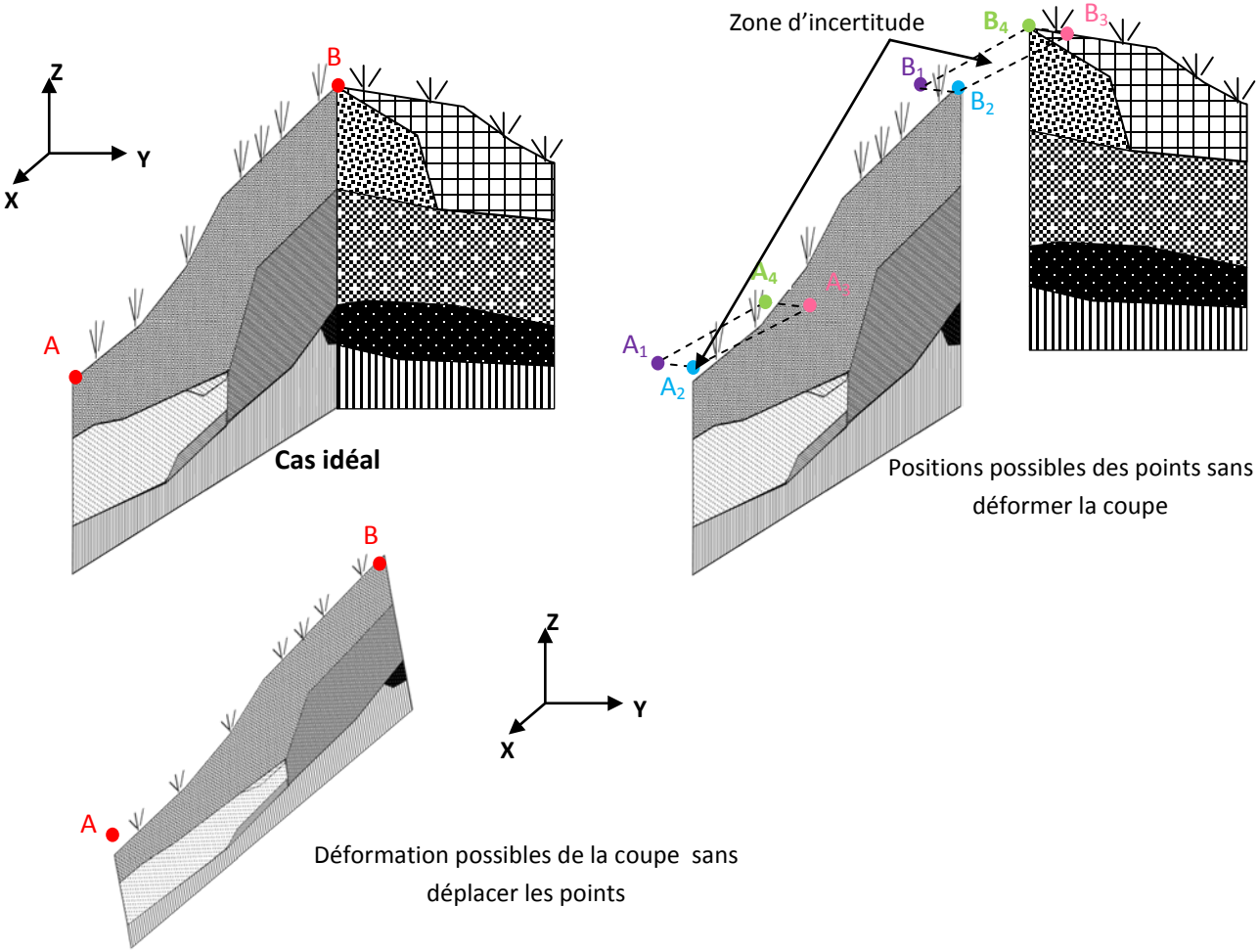


FIGURE 47 - VUE EN PERSPECTIVE DES ZONES D'INCERTITUDES SUR LA POSITION DES POINTS DE REFERENCE

Toutes ces incertitudes génèrent des écarts pouvant aller jusqu'à plus de 15 cm sur la position des points.

Pour pallier ces difficultés, et en accord avec l'archéologue M. Koch, nous avons prêté davantage d'importance à l'aspect visuel et à la cohérence géométrique des strates des coupes, plutôt qu'à l'exactitude de la position des points d'extrémité. L'accent est en effet porté sur la visualisation globale des coupes au sein du modèle 3D, et au vu de la précision des données d'origine, des écarts d'une vingtaine de cm sont tolérés.

3.3.3 NOMBRE DE POINTS DE REFERENCES

Le troisième problème est le nombre de points de référence pour une coupe donnée. En effet nous disposons des deux points d'extrémité mais il faut au moins trois points pour orienter la coupe en 3D. Le risque dans notre cas est que la coupe effectue une rotation autour de l'axe défini par les deux points d'extrémité (Figure 48).

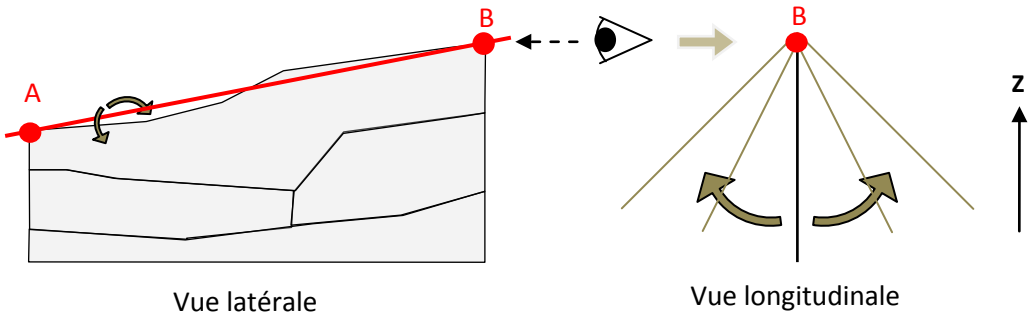


FIGURE 48 - ROTATION POSSIBLE DE LA COUPE AVEC DEUX POINTS DE REFERENCE

Cette difficulté est contournée par le principe de verticalité des coupes, que nous avons systématiquement appliqué.

3.4 INTEGRATION DES COUPES A L'ESPACE 3D ET AU MODELE 3D

Nous avons évoqué dans le paragraphe précédent les difficultés rencontrées lors de l'orientation des coupes (géoréférencement), et nous allons maintenant décrire plus précisément les méthodes choisies pour y parvenir. Nous avons tout d'abord essayé de mettre en place une chaîne de traitement sous *AutoCAD Map 3D*, qui permet de gérer des données 3D avec précision (mm). La Figure 49, page suivante retrace les étapes de géoréférencement réalisées sur *AutoCAD Map 3D*. Nous pouvons constater sur ce schéma logique les nombreuses opérations nécessaires, notamment le changement de repère SCU pour effectuer la rotation de la coupe et assurer sa verticalité, ainsi que l'assurance qu'il n'y ait pas de blocs imbriqués (blocs constitués d'autres blocs). En effet les coupes doivent pouvoir être importées dans le logiciel *Google Sketchup*, qui ne gère pas les blocs imbriqués et il faut systématiquement exploser le bloc général de la coupe (créé automatiquement lors de l'importation du *.dxf). Ces contraintes nous ont poussés à mettre en place une chaine de traitements plus simple et plus rapide, et nous avons utilisé directement *Google Sketchup*. Les opérations sont détaillées dans l'annexe J, page 41, et la Figure 50 page 46 récapitule le principe de la méthode. Au final, nous obtenons une version *.skp de chaque coupe (au sens synecdochique du terme), que nous importons ensuite successivement dans le modèle 3D.

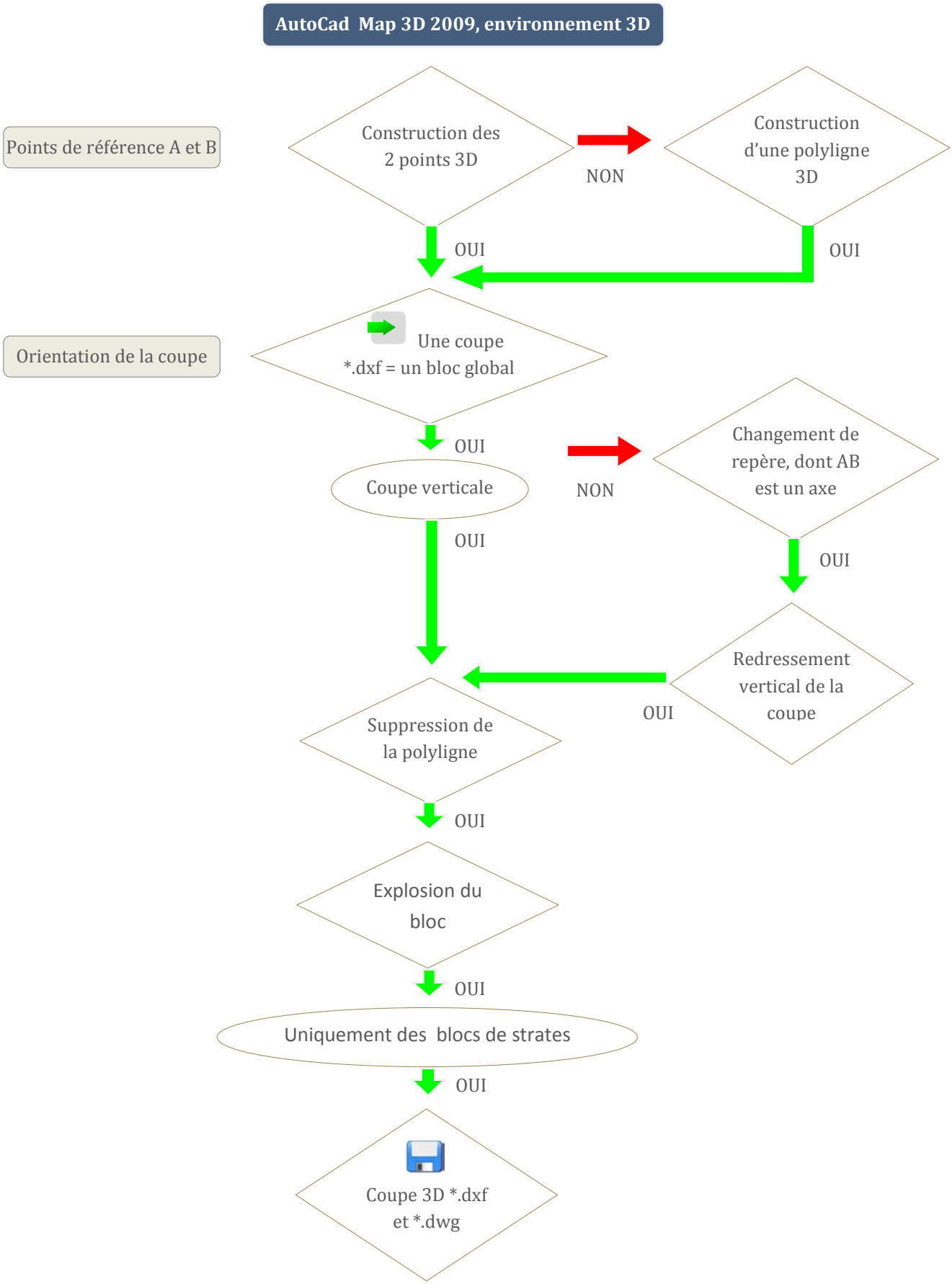


FIGURE 49 - SCHEMA LOGIQUE DE GEOREFERENCEMENT SOUS AUTOCAD MAP 3D

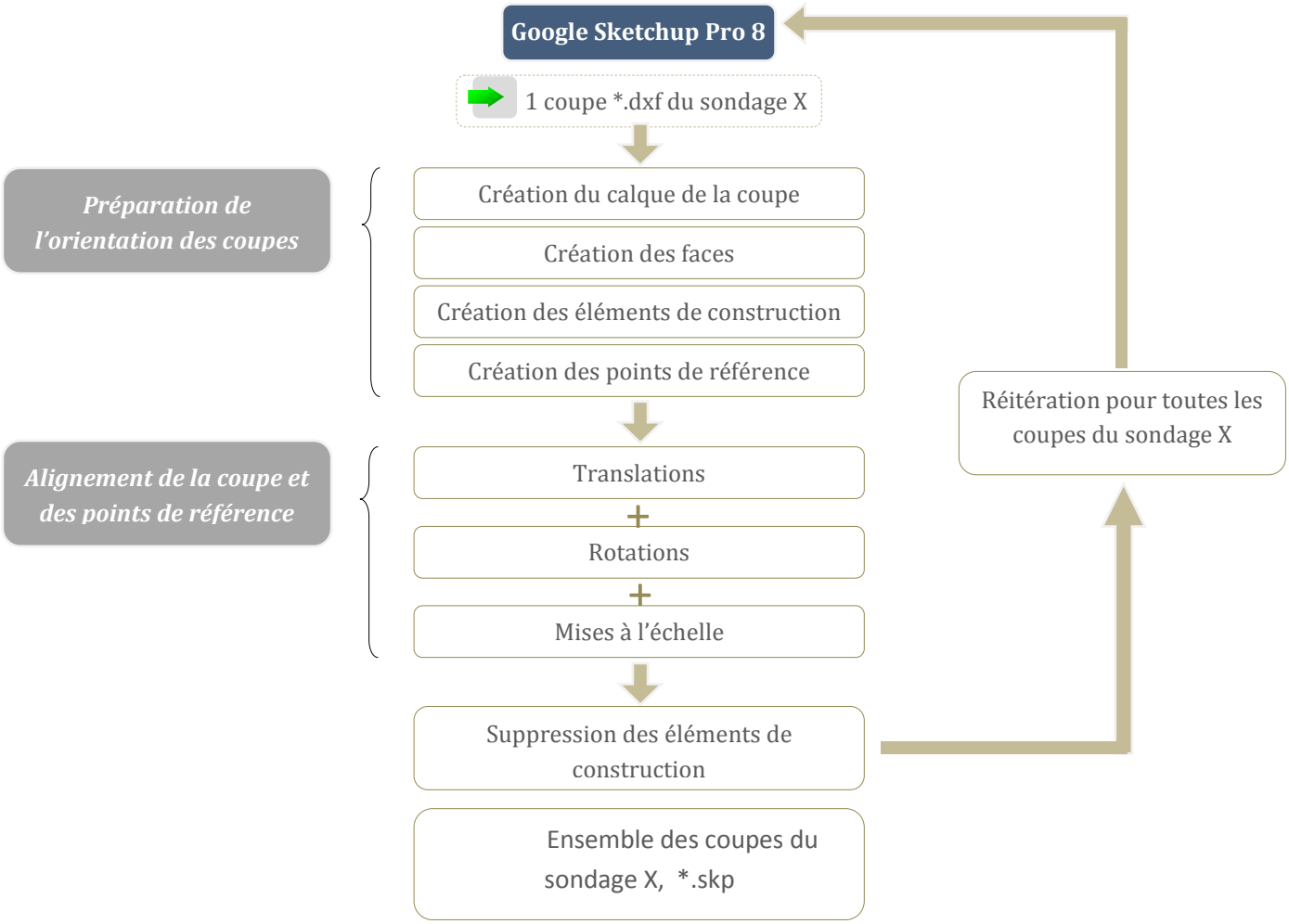

Google Sketchup Pro 8
1 coupe *.dxf du sondage X
Préparation de l'orientation des coupes
Création du calque de la coupe
Création des faces
Création des éléments de construction
Création des points de référence
Alignement de la coupe et des points de référence
Translations
+
Rotations
+
Mises à l'échelle
Suppression des éléments de construction
Réitération pour toutes les coupes du sondage X
Ensemble des coupes du sondage X, *.skp

FIGURE 50 - PRINCIPALES ETAPES DU GEOREFERENCEMENT DES COUPES

Depuis le fichier *Google Sketchup* du modèle 3D, nous avons importé l'ensemble des coupes et obtenu l'intégralité de nos données dans un seul et même environnement. La Figure 51 ci-dessous nous présente une coupe raster (S1_S2_ABD) et son équivalent en 3D colorisé dans l'environnement *Google Sketchup*.

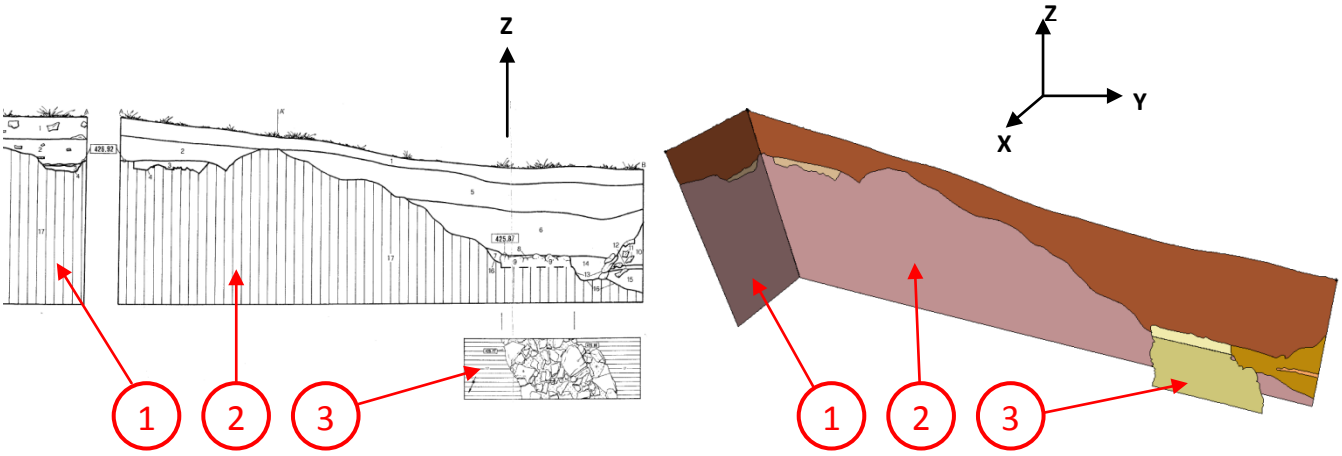


FIGURE 51 - COUPE RASTER ET SON EQUIVALENT 3D

Nous avons donc numérisé, vectorisé et orienté les coupes archéologiques pour lesquelles nous disposions de points de références, et elles sont désormais intégrables au modèle 3D. Le chapitre suivant traite de cet assemblage ainsi que des applications que le modèle 3D, les coupes 3D et leur assemblage permettent.

4 RESULTATS ET APPLICATIONS

Ce dernier chapitre présente les résultats de la modélisation du site, des coupes 3D, ainsi que leur regroupement. Nous décrirons également quelles sont les utilisations et enrichissements possibles, aussi bien au niveau archéologique, que culturel et touristique.

SOMMAIRE

4.1 Résultats 48
4.1.1 Modèle 3D du site 48
4.1.2 Coupes vectorielles 3D 49
4.1.3 Assemblage des résultats 3D 50
4.2 Utilisation archéologique 51
4.2.1 Exploitation du modèle 3D 51
4.2.2 Exploitation des coupes 3D 51
4.3 Potentialités des résultats visuels 52
4.3.1 Habillage des élements 3D 52
4.3.2 Niveau de détail des résultats 3D 54
4.4 Potentialité de diffusion numérique 54
4.4.1 Vidéo virtuelle de présentation 54
4.4.2 Panoramas 55
4.5 Intégration dans un Système d'Information Géographique 56

4.1 RESULTATS

4.1.1 MODELE 3D DU SITE

La Figure 52 est une vue en plan du modèle 3D, dans l'environnement *Google Sketchup*. Il s'étend en définitif sur presque 2 hectares, dont le quart nord est en réalité recouvert par la forêt. Celle-ci n'est pas visible sur la Figure 52 car seul le terrain et les vestiges du château ont été modélisés (cf. 4.3.1, page 55 pour la végétation). Le fichier *.skp du modèle seul pèse environ 50 Mo et nécessite donc une mémoire informatique importante.

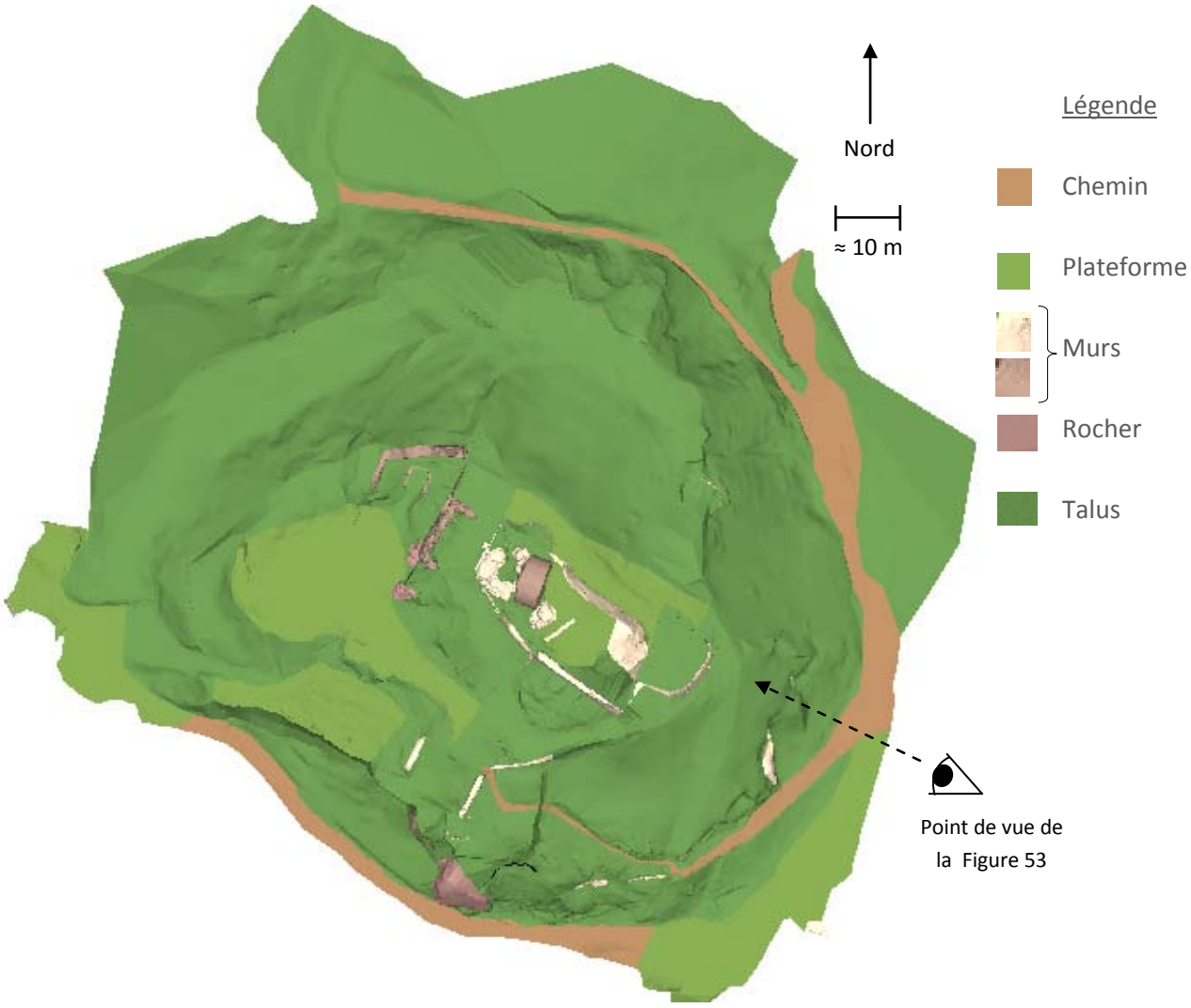


FIGURE 52 - VUE EN PLAN DE L'ENSEMBLE DU MODELE 3D DU SITE DE L'ENGELBOURG

Nous avons modélisé l'intégralité des données acquises par lasergrammétrie et photogrammétrie. Les ombres nous permettent de distinguer le relief du site et le choix des couleurs nous donne un aspect assez réaliste du site. La Figure 53 est une vue Nord-Ouest du modèle.

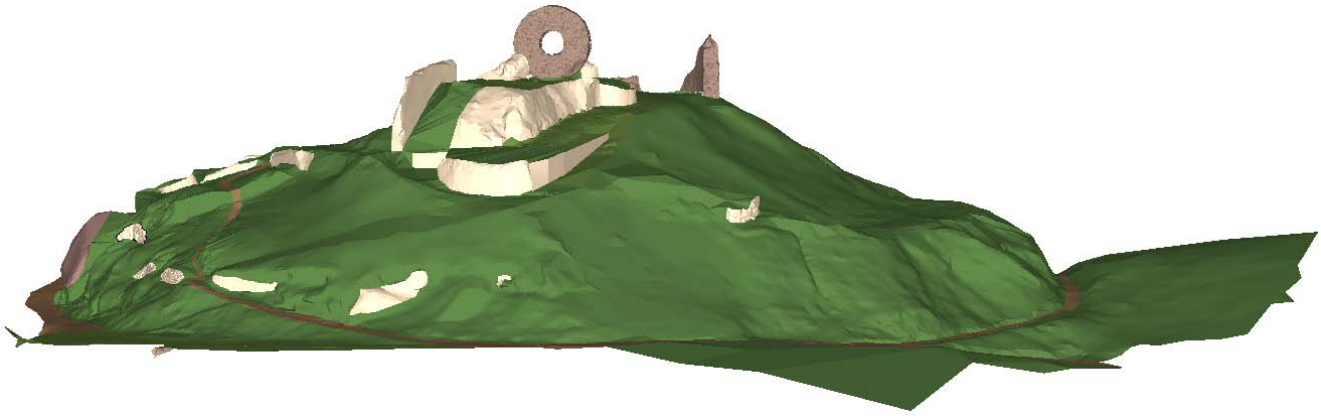


FIGURE 53 - VUE ORIENTEE NO DU MODELE 3D

A titre de comparaison, voici sur la Figure 54 une photographie du site, orientée N-NE, et à côté, approximativement la même vue du modèle 3D.

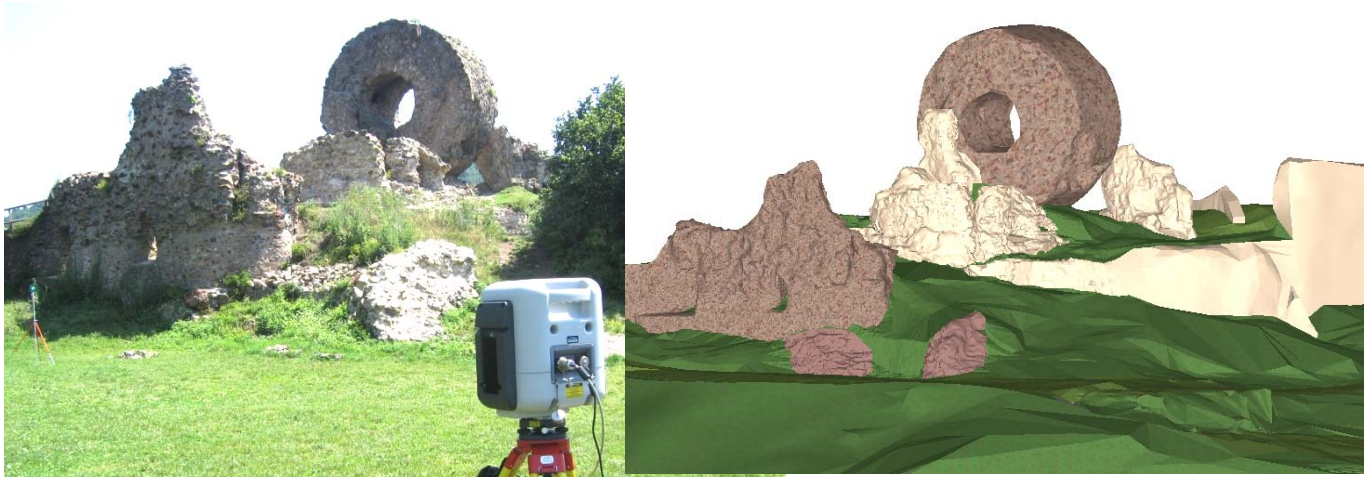


FIGURE 54 - COMPARAISON VISUELLE D'UNE PHOTOGRAPHIE DU SITE ET D'UNE VUE DU MODELE 3D

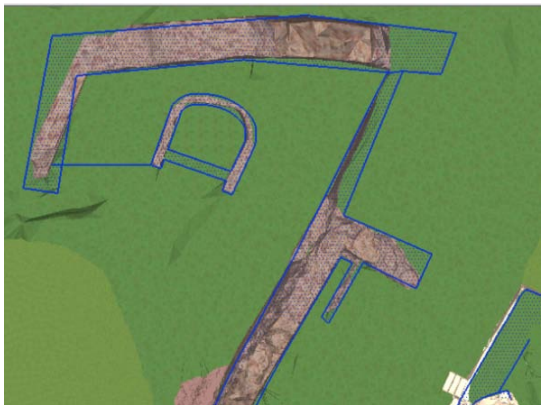


FIGURE 55 - SUPERPOSITION DU PLAN DE 1160 ET DU MODELE 3D

En superposant au modèle 3D le levé du géomètre (en bleu), on obtient un assemblage dont est extraite l'image ci-contre (Figure 55). La superposition semble correspondre et nous conforte dans l'idée que le modèle est visuellement proche de la réalité, malgré les difficultés que nous avons pu rencontrer pour modéliser avec précision les ruines.

4.1.2 COUPES VECTORIELLES 3D

Nous avons vectorisé l'ensemble des coupe 3D pour lesquelles nous avions suffisamment de points de références, et obtenons environ 15 coupes de sondages, soit une vingtaine de coupes au total. La

Figure 56 est un zoom d'une vue NO des coupes, dans l'environnement *Sketchup* : On y voit les différentes orientations des coupes, et leur répartition dans l'espace 3D.

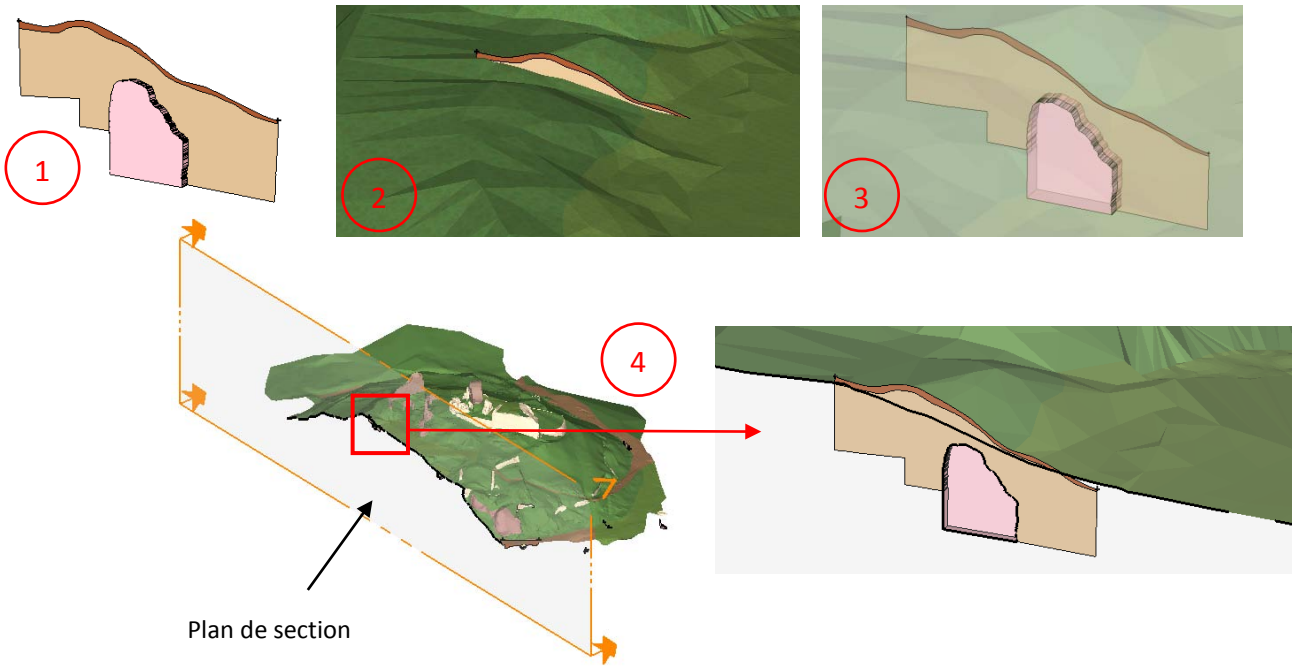


FIGURE 56 - DIFFERENTES VISUALISATIONS D'UNE COUPE 3D INTEGREE AU MODELE.
1. COUPE ISOLEE 2.COUPE INTEGREE AU MODELE 3.MODE TRANSPARENCE 4.PLAN DE SECTION DANS LE SENS DE LA COUPE

4.1.3 ASSEMBLAGE DES RESULTATS 3D

Les coupes représentent les strates du sous-sol, aussi lorsqu'elles sont intégrées au modèle 3D, elles sont recouvertes par le terrain et l'on ne voit que les strates d'altitude supérieure au terrain. Cependant le mode transparence ou les plans de section permettent de les visualiser. La Figure 57 ci-dessous nous montre un exemple de coupe (S5_S2_AB) sous ces quatre modes d'affichage : isolée, intégrée au modèle, en mode transparent, et dans un plan de section.

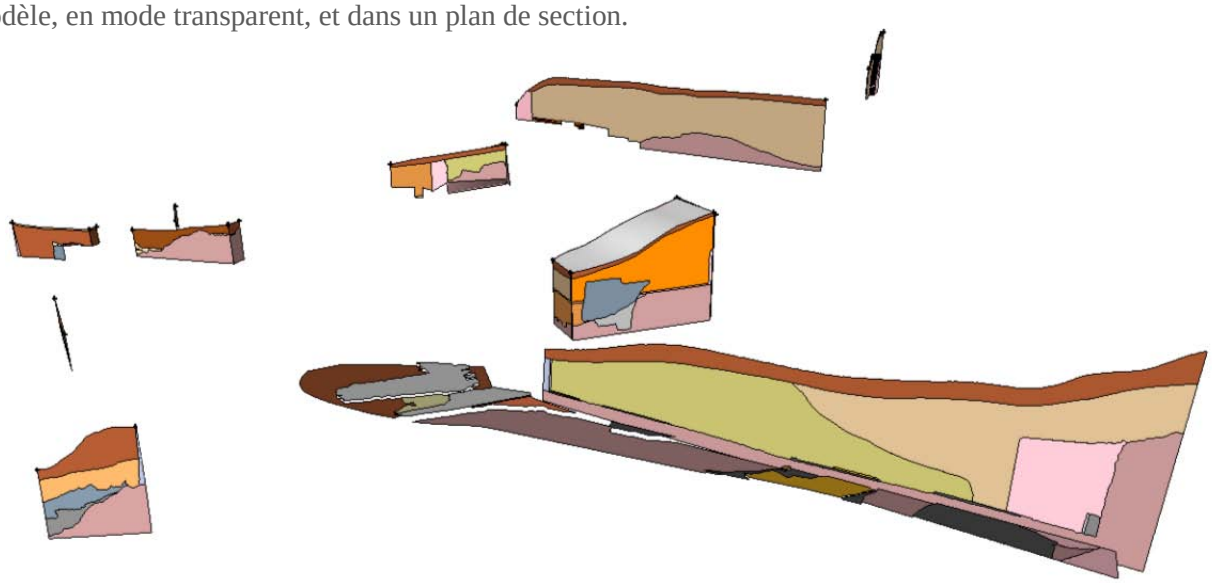


FIGURE 57 - EXTRAIT DE L'ASSEMBLAGE DES COUPES 3D SOUS GOOGLE SKETCHUP

4.2 UTILISATION ARCHEOLOGIQUE

4.2.1 EXPLOITATION DU MODELE 3D

Au niveau archéologique, la représentation du site en 3D permet d'avoir une vue d'ensemble de tous les vestiges, l'organisation spatiale du site, les reliefs et les proportions. Tous les objets, visualisable en même temps peuvent être comparés directement. Certaines hypothèses peuvent naitre de ce nouvel angle de vue, comme par exemple la correspondance des objets entre eux. Nous avons par exemple utilisé l'outil de modélisation de primitives pour calculer le diamètre moyen d'un vestige *a priori* cylindrique. Le cylindre généré possédant le même diamètre que l'Œil de la Sorcière, l'archéologue M. Koch a pu confirmer l'origine commune de ces deux objets. La Figure 58 ci-dessous représente la création de la primitive cylindrique.

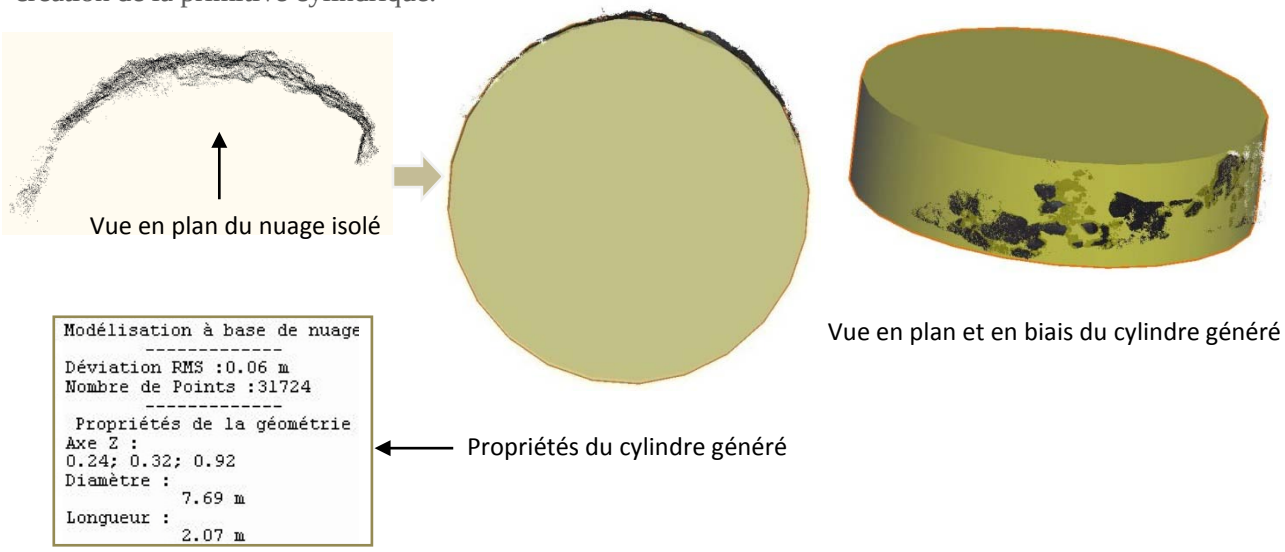


FIGURE 58 - GENERATION DE PRIMITIVES A PARTIR DE NUAGES DE POINTS 3D

La rapidité de ces manipulations permet de consacrer plus de temps aux analyses et à l'établissement d'hypothèses. Les possibilités d'affichage et de déplacement des objets permettent aux archéologues de simuler des scénarios d'évènements et leur chronologie associée, multipliant ainsi les pistes d'études archéologiques.

4.2.2 EXPLOITATION DES COUPES 3D

La visualisation 3D des coupes donne une vue d'ensemble de leur disposition et permet aux archéologues de comprendre plus rapidement la structure du sous-sol et d'établir des hypothèses sur la chronologie et les scénarios possibles des évènements. *Google Sketchup* possède des outils d'extrusion de surface pour créer du volume à partir d'une forme plane et ainsi générer des hypothèses sur la continuité des strates et leurs liens avec les coupes voisines. Il est également possible d'utiliser les outils de modélisation tels que le plugin *Curviloft* pour simuler la surface d'une strate entre deux coupes d'un même sondage. La Figure 59 illustre ces simulations.

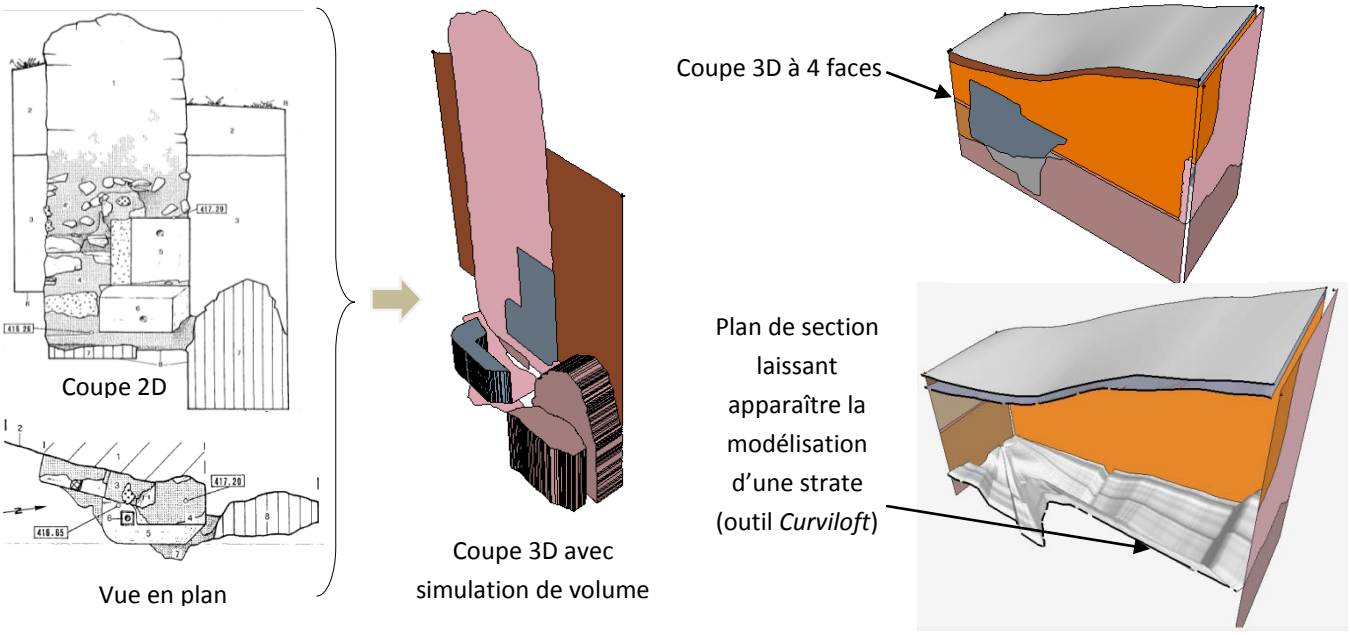

Coupe 2D
Vue en plan
Coupe 3D avec simulation de volume
Coupe 3D à 4 faces
Plan de section laissant apparaître la modélisation d'une strate (outil *Curviloft*)

FIGURE 59 - EXEMPLE DE SIMULATION DE VOLUME SUR LES COUPES 3D DANS GOOGLE SKETCHUP

4.3 POTENTIALITES DES RESULTATS VISUELS

4.3.1 HABILLAGE DES ELEMENTS 3D

Bien que le texturage ne fut pas la priorité dans la modélisation du site, nous avons tout de même réalisé quelques essais, notamment sur les murs, qu'il serait intéressant de rendre aussi réaliste que possible. La géométrie très complexe de la plupart des éléments nous a très vite montré les limites de ces procédés. Pour ne pas alourdir le nombre de logiciel utilisé dans les chaines de traitement, nous avons limité nos essais à *3D Reshaper* et *Google Sketchup*, déjà utilisés dans ce projet. *3D Reshaper* permet l'application d'une texture à un maillage à partir d'une image importée, en affectant des points homologues entre le maillage et l'image. Mais les textures importées n'étant pas supportées par *Google Sketchup* lors de l'import, nous avons donc essayé de texturer directement dans ce logiciel. Il est en effet possible de projeter une image sur une surface en tant que texture, mais ici la manipulation reste très incertaine car il n'y pas d'accrochage possible autre qu'aux quatre coins de l'image et pas de points communs à sélectionner. De plus les projections ne sont possibles que sur des surfaces aux géométries simples (plans, sphères, cylindres, etc.), car sur des objets géométriquement plus complexes, l'image de la texture risque d'être déformée. Les textures génériques de la bibliothèque de matières du logiciel ne sont également pas adaptées à nos modèles maillés. La texture est en effet appliquée sur chaque surface (ici une surface correspond à une maille) indépendamment des autres, sans continuité avec les mailles voisines. Les tailles des mailles pouvant être de seulement quelques centimètres parfois, cela rend incompréhensible le motif de la texture. Nous avons comparé sur la Figure 60 le texturage générique d'une figure plane et d'un mur du site pour montrer la différence de résultats.

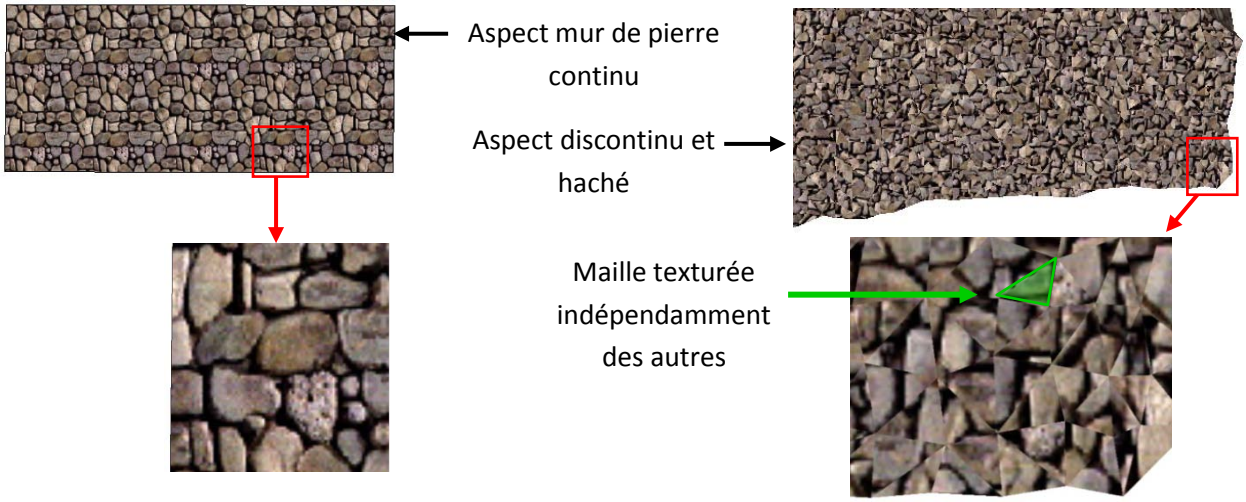


FIGURE 60 - COMPARAISON DE TEXTURAGE GENERIQUE SUR UN MUR DU SITE ET UNE SURFACE PLANE SOUS GOOGLE SKETCHUP

Nous avons donc préféré utiliser des couleurs unies, pour ne pas fausser l'interprétation de la texture et ne pas surcharger le modèle visuellement (de même pour les coupes 3D).

L'habillage du modèle comporte également une partie « accessoires » comme la végétation ou le mobilier, qui rendent encore plus réaliste le modèle 3D. Nous avons pour cela accès à quelques composants dans la bibliothèque de *Google Sketchup*, mais il est possible de télécharger d'autres composants sur internet, grâce aux nombreux utilisateurs qui partagent leurs créations. Voici ci-dessous quelques exemples d'habillage (Figure 61) :

FIGURE 61 - EXEMPLE D'HABILLAGE DU MODELE 3D

4.3.2 Niveau de detail des resultats 3D

Les objets maillés à partir des points laser sont très détaillés du fait de la densité des nuages de points. Pour les archéologues, ce niveau de détail est intéressant car il permet de prendre des mesures et analyser la géométrie des objets. Mais d'un point de vue communication adressée au grand public, il n'est pas nécessaire d'avoir autant de détails. De plus, le grand nombre de mailles alourdit fortement la taille du fichier *.skp et ralentit la fluidité de navigation. Il est donc possible de suivre la procédure résumée dans le schéma suivant (Figure 62) et appliquée au mur S6_M_C_2 (à droite):

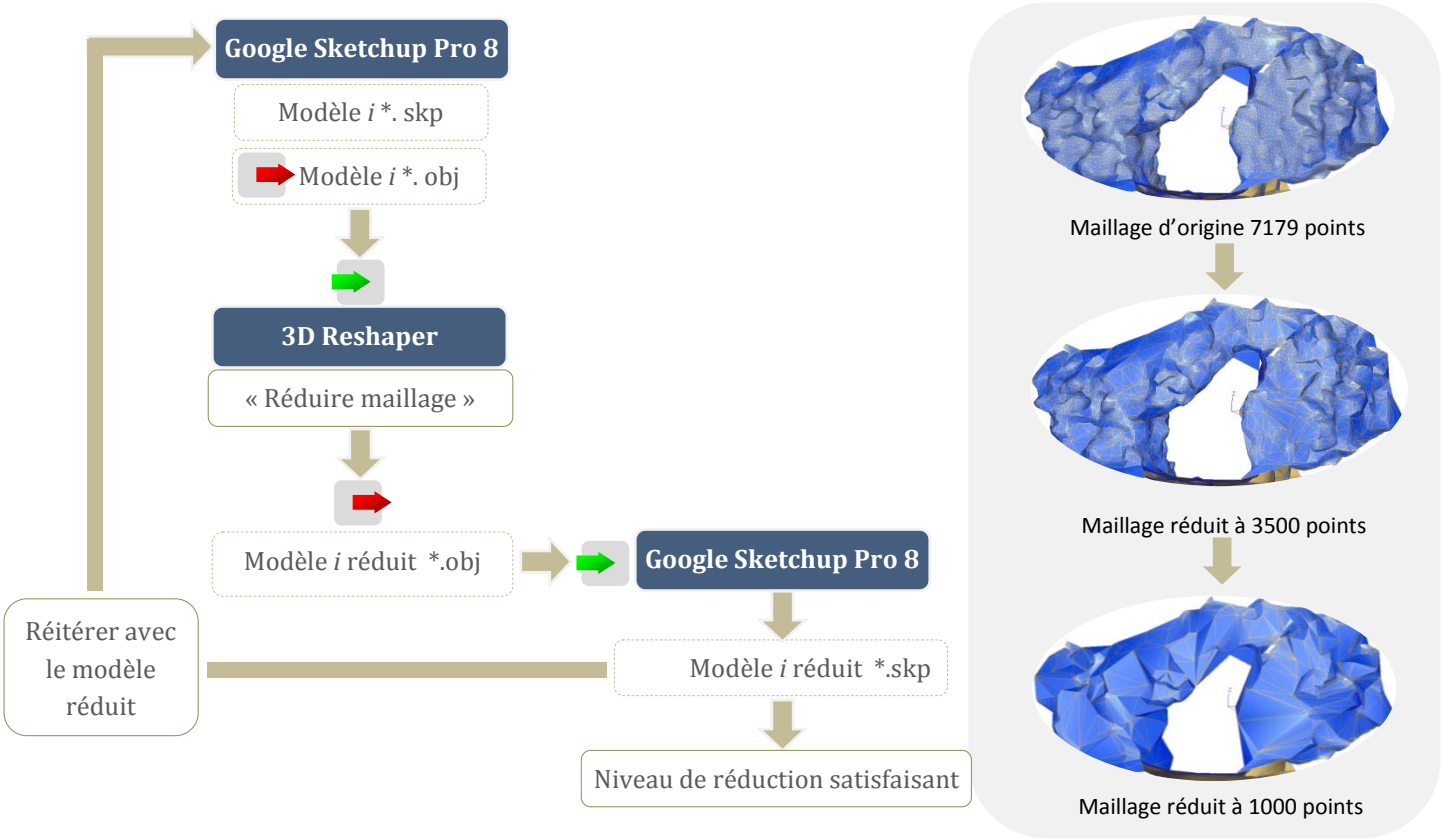

Google Sketchup Pro 8
Modèle *i* *. skp
Modèle *i* *. obj
3D Reshaper
« Réduire maillage »
Modèle *i* réduit *.obj
Google Sketchup Pro 8
Modèle *i* réduit *.skp
Niveau de réduction satisfaisant
Réitérer avec le modèle réduit
Maillage d'origine 7179 points
Maillage réduit à 3500 points
Maillage réduit à 1000 points

Figure 62 - schema recapitulatif de l'etape de reduction des maillages

Nous obtenons ainsi pour chaque objet maillé différents niveaux de détails en fonction des besoins.

4.4 Potentialites de diffusion numerique

4.4.1 Video virtuelle de presentation

Le modèle 3D ainsi que les coupes archéologiques 3D peuvent être présentées dans une animation vidéo, générée dans *Google Sketchup* et exportée *.avi. Pour créer une animation, il suffit d'afficher la vue souhaitée et de l'enregistrer → *Affichage*/ *Animation*/ *Ajouter une scène*, et ainsi de suite pour toutes les scènes qui composeront la vidéo. L'onglet *Lire* permet de visualiser le résultat. Une animation permet de faire découvrir le modèle rapidement et globalement, et de cibler les zones à

présenter, tout en ayant un fichier plus léger que le modèle 3D *.skp de *Google Sketchup* qui pèse plusieurs dizaines de Mo.

4.4.2 PANORAMAS

A la demande de la commune de Thann, nous avons réalisé une série de panoramas du site à partir de photographies. Il est nécessaire d'avoir un recouvrement minimum entre chaque photo successive pour que le logiciel détermine automatiquement des points homologues. L'utilisation d'un trépied facilite la gestion de l'angle de décalage et nous les photos sont assemblées selon une trame régulière. Nous avons utilisé le logiciel *AutoPano p*our réaliser une série de panoramas.

FIGURE 63 - EXEMPLE DE PANORAMA CREE A PARTIR DE 49 PHOTOS

Il est possible de créer sur chaque panorama des points de connexion (*Hotspots*). Ces points interactifs ouvrent ou renvoient vers d'autres documents qui peuvent être de natures diverses :

- Images raster
- Vidéos
- Liens URL
- Pages html
- Autres panoramas
- etc.

FIGURE 64 - FENETRE DE LIAISON ENTRE LES PANORAMIQUES : POINTS CHAUDS ET LIAISONS (*HOTSPOTS*)

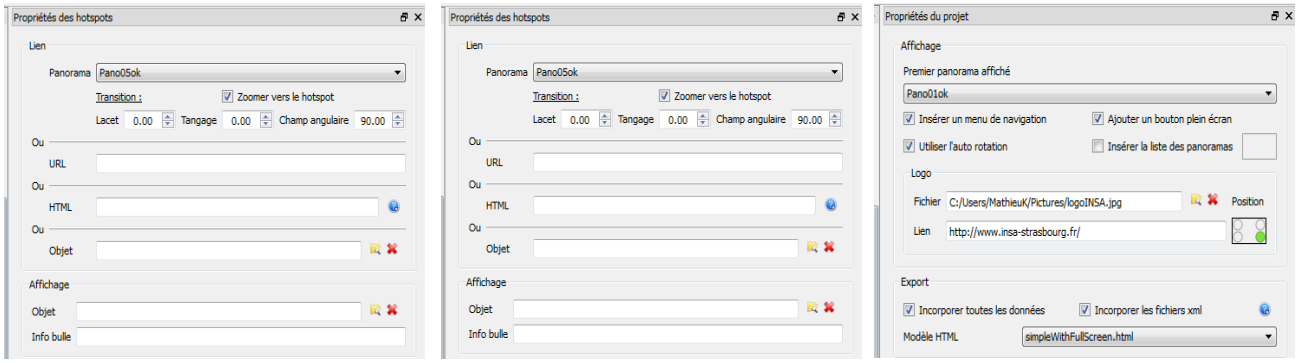


FIGURE 65 - INTERFACES DES PROPRIETE DES *HOTSPOTS*, PANORAMAS, ET DU PROJET

Lors du visionnage d'un panorama, les points de connexion peuvent prendre différentes formes : points clignotants, fenêtres en surbrillance, etc.

FIGURE 66 - EXTRAIT D'UNE VISITE PANORAMIQUE VIRTUELLE ET EXEMPLE DE HOTSPOTS

4.5 INTEGRATION DANS UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Comme nous l'avons évoqué dès le début de ce mémoire, l'une des ambitions de ce projet de valorisation du site est d'intégrer l'ensemble des données 3D à un Système d'Informations Géographiques (SIG), a partir des fichiers *.skp que nous avons créé. Nous nous sommes basés sur une segmentation du modèle en secteurs, puis en type d'objet que nous avons considéré unitaires. Dans notre étude, un objet unitaire est un objet distinct et identifiable des autres tels qu'un mur ou un rocher. Le terrain a été segmenté en petites portions unitaires, dissociant les talus des plateformes et des chemins. La Figure 67 suivante est une vue en plan du modèle 3D, dont chaque couleur représente un élément unitaire, et à gauche, en exemple, l'Œil de la Sorcière isolé (nommé dans notre étude S6_M_C_5).

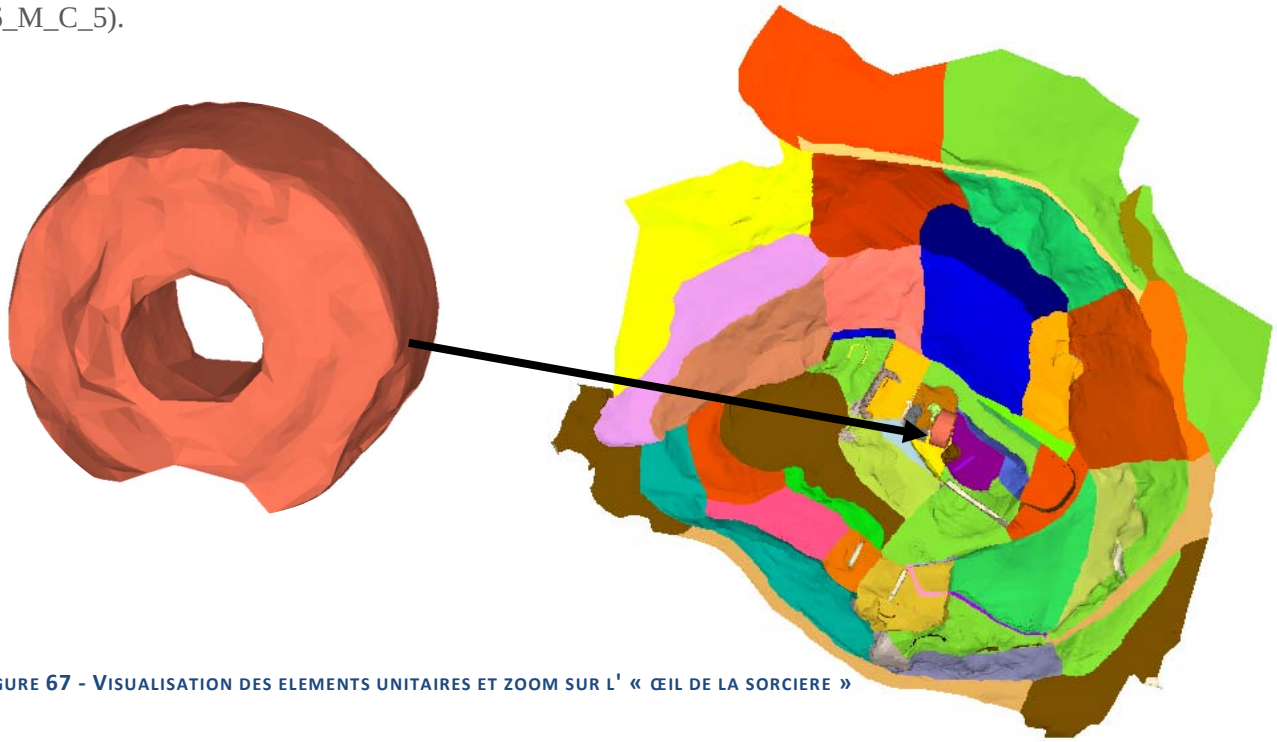


FIGURE 67 - VISUALISATION DES ELEMENTS UNITAIRES ET ZOOM SUR L' « ŒIL DE LA SORCIERE »

Les données intégrées sont géoréférencées, c'est-à-dire associées à un système de coordonnées.

Le logiciel de SIG utilisé est *ArcScene*, et il existe plusieurs façons, combinables, d'intégrer le modèle ou les parties du modèle, en fonction du niveau de détail souhaité. En annexe L, page 47 est détaillé les procédures d'intégration selon les différentes méthodes.

INTEGRATION MULTIPATCH

Le principe est d'importer un objet *.skp en tant que bloc unitaire, c'est-à-dire, indécomposable et associé à une même table. Si l'on considère le modèle 3D comme l'objet et qu'on l'importe en « multipatch », il est impossible de sélectionner un élément de la maquette autre que la maquette elle-même (Figure 68). Cela correspond approximativement à un bloc dans *AutoCad* ou à un groupe dans *Google Sketchup*. L'avantage de cette méthode est d'avoir un fichier plus léger et donc un affichage plus fluide.

INTEGRATION POLYFACES

Le principe est d'importer un objet *.skp en temps qu'ensemble des polygones qui le composent. Ainsi, il est possible de sélectionner indépendamment chaque polygone de l'objet et de lui affecter des informations différentes des autres polygones (Figure 69). Cette méthode peut être utilisée lorsque les polygones de l'objet contiennent des informations spécifiques, comme par exemple un mur, dont il peut être intéressant pour un archéologue de connaitre les informations des polygones qui le composent (coordonnées, matériau, date, etc.)

INTEGRATION DE POINTS

Nous pouvons importer dans le SIG des nuages de points correspondant aux objets, et comme pour les modèles 3D, il existe deux façons de les intégrer : en tant que « multipoints », c'est-à-dire un seul et même objet indécomposable, ou en tant qu'« entités points indépendants », où chaque point du nuage est sélectionnable et contient des informations qui lui sont propres. Le choix de la méthode dépend de la nécessité ou non de connaitre les informations spécifiques à chaque point.

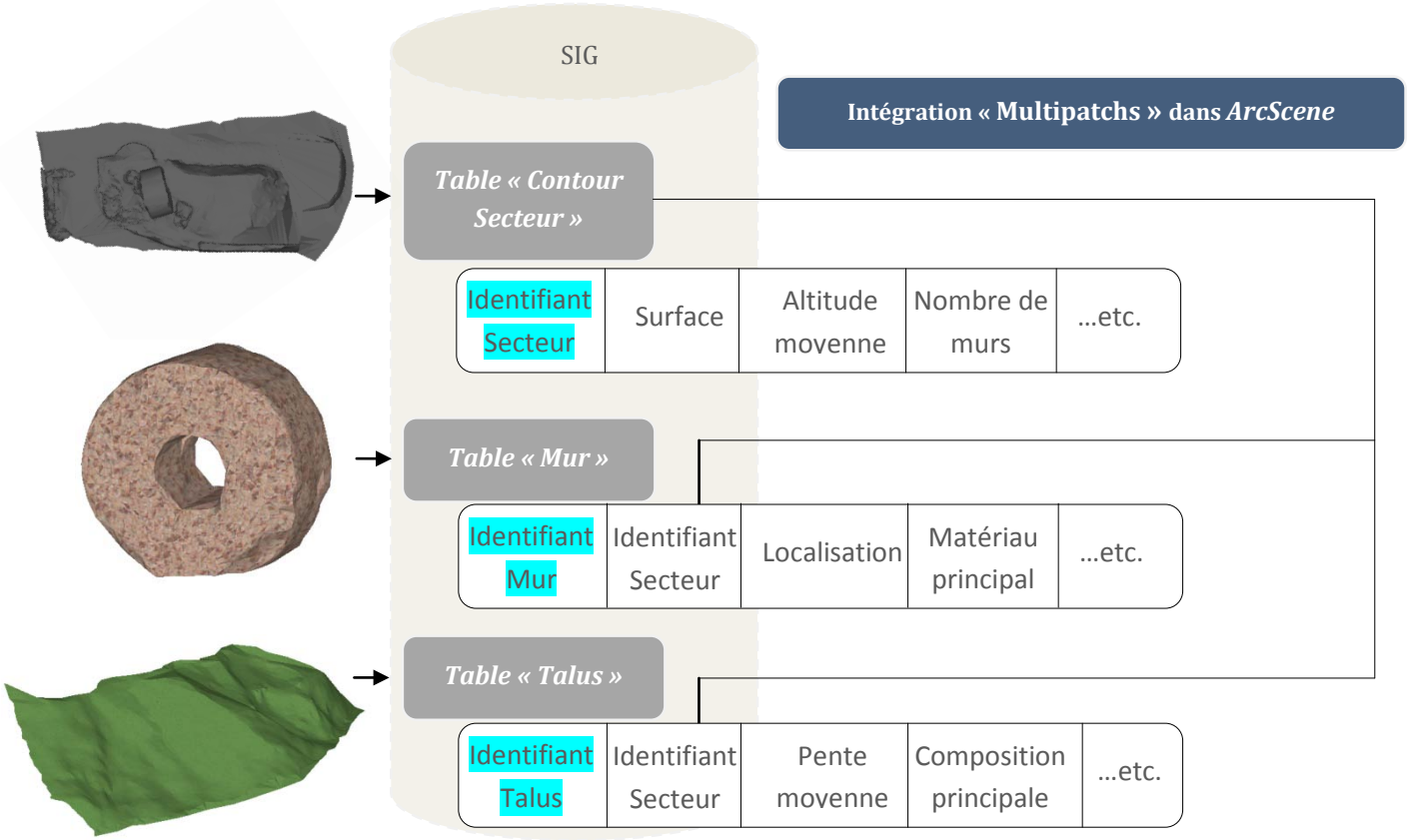


FIGURE 68 - EXEMPLE DE DONNEES INTEGREES SOUS FORME "MULTIPATCH"

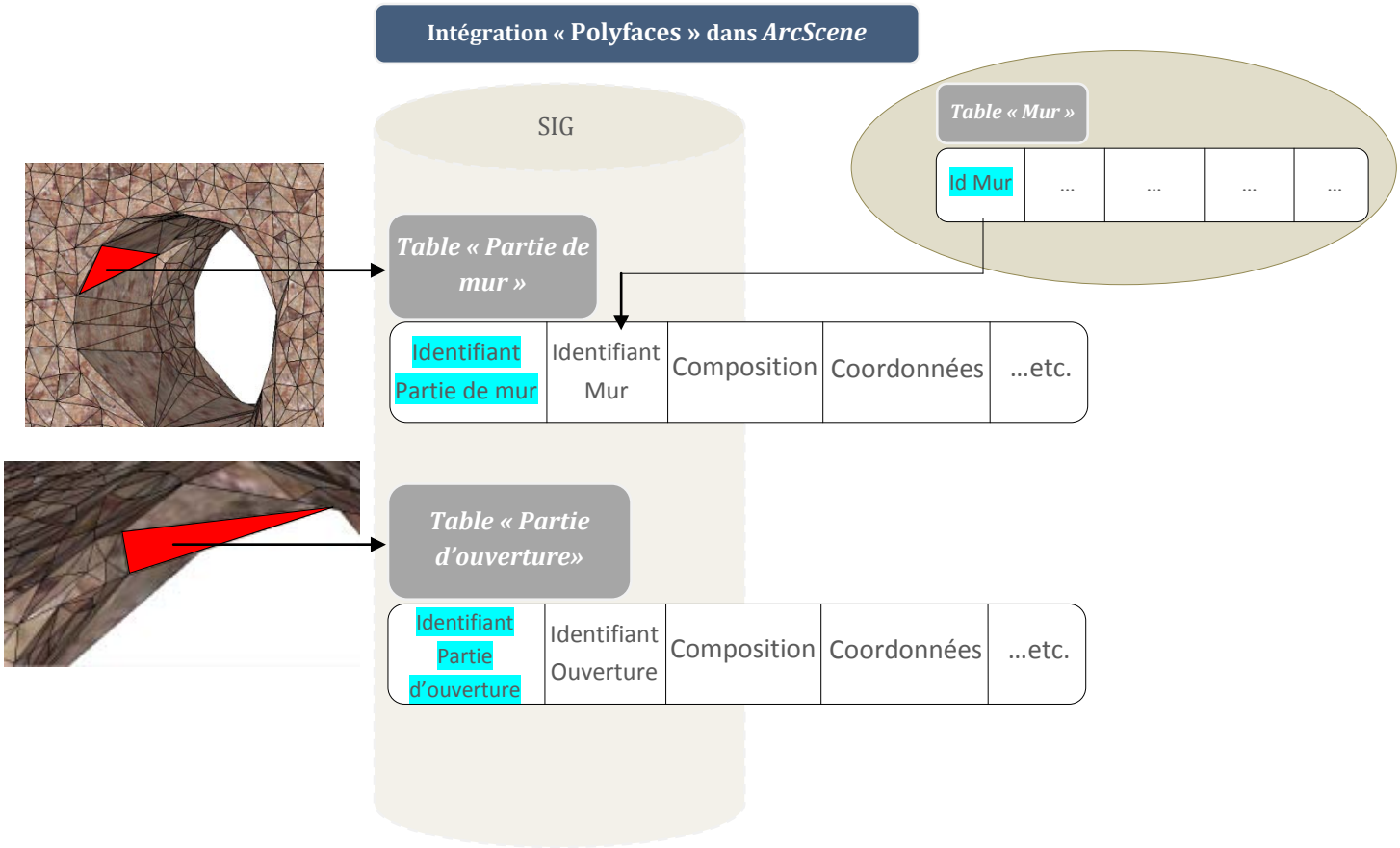


FIGURE 69 - EXEMPLE DE DONNEES INTEGREES EN "POLYFACES"

Dans le Tableau 6 ci-dessous, nous indiquons un exemple de niveaux de détail pour chaque type d'objet. Nous nous sommes basés sur les possibilités d'exploitations archéologiques et culturelles des objets modélisés. En effet, nous avons considéré dans cette étude qu'il n'était pas nécessaire d'importer les talus, chemins, plateformes et contour de secteurs en polyfaces ou points mais que pour les murs, rochers et ouvertures, cela serait pertinent.

	Contour Secteur	Mur	Ouverture	Rocher	Talus	Chemin	Plateforme
Multipatch	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**
Multipoints	**Non**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Oui**
Polyfaces	**Non**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Non**	**Non**	**Non**
Entités points	**Non**	**Oui**	**Oui**	**Oui**	**Non**	**Non**	**Non**

\- détails

\+ détails

TABLEAU 6- EXEMPLE DE MODES D'INTEGRATION SELON LES OBJETS

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les objectifs de ce projet étaient de participer à la valorisation numérique du site de l'Engelbourg d'un point de vue archéologique et patrimonial. Dans se contexte, la commune de Thann et les membres du Pôle Archéologique Interdépartemental Rhénan souhaitaient obtenir un modèle 3D du site et de ses vestiges. Disposant également de données archéologiques 2D, issues de la campagne de fouilles de M. Ehretsmann, nous avons envisagé l'étude de leur intégration au modèle 3D et l'association de l'ensemble à un Système d'Information Géographique (SIG).

Le site de l'Engelbourg a été modélisé à partir des données acquises sur le terrain, et nous avons appliqué au modèle des couleurs cohérentes et quelques éléments d'habillage pour obtenir une maquette très réaliste. Les données d'archives 2D, c'est-à-dire dans notre cas les coupes archéologiques de M. Ehretsmann, ont été numérisées, vectorisées et nous avons pu les intégrer au modèle 3D. Celui-ci a par ailleurs été utilisé pour mettre en place des procédés d'intégration de données 3D dans un SIG. Les résultats obtenus nous permettent de visualiser chaque objet 3D individuellement, sous plusieurs formes (nuage de points, objet maillé, modèle 3D, etc.) et à plusieurs niveaux de détail.

Le modèle 3D intégré au SIG est un moyen de communication précieux pour la valorisation du site. Accessible à tous, y compris aux personnes ne pouvant pas se rendre sur les lieux, il permet de faire découvrir le château et son histoire d'une façon pédagogique et pertinente. D'un point de vue archéologique, le modèle 3D apporte une vision d'ensemble et un recul sur la constitution du site, qu'un document 2D peut difficilement offrir. La navigation 3D et l'intégration de données 2D au modèle permettent d'analyser les vestiges d'une autre façon, contribuant à l'établissement plus rapide de nouvelles hypothèses. Complémentaire aux autres méthodes déjà exploitées en archéologie, l'analyse par la vision 3D est, pour les scientifiques, un gain de temps non négligeable qu'ils peuvent ainsi consacrer à l'étude plus approfondie de certaines hypothèses mises de côté.

En parallèle, nous avons créé plusieurs panoramas, et mis en place une visite virtuelle et interactive du site.

Dans l'optique de pérenniser ce projet, et afin d'offrir aux futurs exécutants les moyens de reprendre et mettre à jour cette étude, nous avons testé et mis en place des méthodologies de traitements, aussi transparentes et reproductibles que possible. Nous avons ainsi pu dégager des procédures claires et ordonnées, applicables aussi bien au cas de l'Engelbourg qu'à d'autres études similaires.

Ces expérimentations ont également montré les limites auxquelles nous avons été confrontés, en termes de moyens informatiques, de temps et de compétences. Nous nous sommes basés sur les logiciels disponibles au laboratoire de l'INSA, que nous connaissions déjà, et sur des logiciels gratuits. La prise en main fut donc rapide et nous avons réduit le nombre de logiciels différents, évitant ainsi la multiplication des opérations. Mais ce choix limite *de facto* la qualité des résultats à ce que peuvent offrir ces logiciels. Concernant l'habillage et le rendu visuel de la maquette, nous avons exploité au maximum nos compétences, mais l'intervention d'un professionnel en graphisme et technologies numériques 3D serait plus probante. De même, la délimitation du site en objets unitaires a été effectuée de façon logique mais relativement arbitraire, et l'intervention à ce niveau d'archéologues serait nécessaire.

C'est donc face à ces constats que de nombreuses perspectives s'ouvrent à ce projet de valorisation numérique :

- La création d'une équipe de travail constituée d'archéologues (pour l'analyse et le découpage des données), de professionnels de la diffusion numérique, et de graphistes (pour le rendu visuel du modèle).
- La mise en place d'une base de données générale et applicable à d'autres sites archéologiques
- La reconstitution 3D du château tel qu'il fut avant sa destruction.
- La mise à jour continue du modèle 3D par des campagnes d'acquisition régulières
- L'intégration de l'ensemble des données d'archives 2D du site (plans, récits, photos, etc.)
- La diffusion du modèle 3D au grand public
- L'ajout d'applications interactives et ludiques sur le modèle 3D tels que des exercices de simulations 3D pour apprendre aux utilisateurs les mécanismes de construction/destruction.
- La création de plusieurs types d'affichage du modèle 3D (selon la saison, selon l'époque, etc.)

M'investir dans ce projet fut l'occasion de collaborer avec plusieurs corps de métiers différents et passionnants, tels que l'archéologie et les métiers de valorisation du patrimoine, qui furent pour moi source de curiosité et de motivation. Cette expérience fut riche en découvertes et m'a fait comprendre l'importance du dialogue et du partage des connaissances dans un projet aussi conséquent que celui de l'Engelbourg. Cela m'a également permis d'approfondir certaines techniques comme l'acquisition et le traitement de données 3D. Au-delà des aspects pratiques, la volonté d'optimiser les processus de traitement a conduit à un travail de recherches et de tests relativement chronophage, mettant en relief l'importance d'une organisation souple et d'une capacité d'adaptation faces aux situations imprévues.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Château de Thann (Engelbourg). A gauche : détail du frontispice de Schenk, 1628. A droite : schéma des éléments de construction correspondant. En rouge : Tour depuis laquelle l' « Œil de la sorcière » est issu. 1
Figure 2 - Photographie de l'« Oeil de la Sorcière ». 1
Figure 3 - Coupe archéologique extraite du rapport de la campagne de fouilles de M. Ehretsmann, 1992. 2
Figure 4 - Plan du site divisé en secteur 2
Figure 5 - Photographie aérienne de Saint Germain de Lusignan CM, camp néolithique de La Coterelle. Jacques Dassier. [@Archaero.com] 7
Figure 6 - Schéma de sondages en quinconce 8
Figure 7 - Schéma de sondages par tranchées continues 8
Figure 8 - Sondages par carottages 8
Figure 9 - Relations principales de la matrice de Harris [F. Giligny, 2006] 9
Figure 11 - Extrait de l'image raster d'une coupe. 11
Figure 10 - Vectorisation de l'extrait avec VectorMagic. 11
Figure 12 - Balayage d'une surface par scanner laser 14
Figure 13 - Mesure des angles et distances d'un point de la sphère par rapport au scanner et son repère 14
Figure 14 - Balayage laser de densité variable 14
Figure 15 - Schéma explicatif du scanner à triangulation 15
Figure 16 - Schéma ramenée en plan du balayage laser avec obstacles 16
Figure 17 - Vue perspective des points d'impact sur la sphère et l'obstacle 17
Figure 18 - Règles de prises de vue pour la stéréorestitution 17
Figure 19 - Illustration des 3 technique de restitution photogrammétrique (El Kahza et al. [2010]) 18
Figure 20 - Nuage de points issu des 1ères campagnes d'acquisition en 2009 23
Figure 21 - Zone de difficulté pour l'utilisation du scanner laser 24
Figure 22 - Zone difficile d'accès, sans points 3D. 24
Figure 23 - Prises de vue des éléments de la zone 25
Figure 24 - Nuage extrait par Photosynth (vue de face a gauche et en plan à droite) 26
Figure 25 - Schéma d'une distorsion « en barillet » due a un objectif grand angle (ici 20mm) 26
Figure 26 - Schéma vue en plan de deux prises de vues successives 26
Figure 27 - Schéma de l'orientation de la caméra sur l'objet à photographier – vue en plan ou bien de coté 27
Figure 28 - Différence de luminosité perturbant la détection de points homologues 27
Figure 29 - Photographie présentant un fort contraste de luminosité 27
Figure 30 - Schéma des traitements numériques effectués sur les points 3D. 28
Figure 31 - Schéma d'une zone de recouvrement entre 2 campagnes d'acquisition espacées dans le temps 29
Figure 32 - Extrait d'un nuage de point avant et après nettoyage de la végétation. 29
Figure 33 - Vue en plan et en coupe de l'échantillonnage topographique d'un talus 29
Figure 34 - Exemple de segmentation de nuage en sous-parties pour facilité le nettoyage 30
Figure 35 - Exemples de maillages réalisés avec 3 paramètres différents 31

Figure 36 - erreurs de maillage dans l'environnement *Google Sketchup* 31
Figure 37 - Schéma des opérations de modélisation des objets maillés 32
Figure 38 - Schéma explicatif des zones de raccords a traiter 33
Figure 39 - Etapes de traitements des données 2D 35
Figure 40 - Schéma d'un sondage et d'une de ses coupes 37
Figure 41 - Opérations effectuées sur une coupe, de la numérisation 2D à l'intégration à la maquette 3D 38
Figure 42 - Schéma d'une image raster vectorisée automatiquement 39
Figure 43 - Informations vectorielles pour une polyligne et un polygone 40
Figure 44 - Vectorisation de la coupe S1_S1_AB par création des blocs de strates et du contour de fouille 40
Figure 45 - Exemple de regroupements de strates pour la création des blocs 41
Figure 46 - Incohérence de certains noms de points d'extrémité 42
Figure 47 - Vue en perspective des zones d'incertitudes sur la position des points de référence 43
Figure 48 - Rotation possible de la coupe avec deux points de référence 44
Figure 49 - Schéma logique de géoréférencement sous AutoCad Map 3D 45
Figure 50 - Principales étapes du géoréférencement des coupes 46
Figure 51 - Coupe raster et son equivalent 3D 46
Figure 52 - Vue en plan de l'ensemble du modèle 3D du site de l'Engelbourg 51
Figure 53 - Vue orientée NO du modèle 3D 52
Figure 54 - Comparaison visuelle d'une photographie du site et d'une vue du modèle 3D 52
Figure 55 - Superposition du plan de 1160 et du modèle 3D 52
Figure 56 - Extrait de l'assemblage des coupes 3D sous Google Sketchup 53
Figure 57 - Différentes visualisations d'une coupe 3D intégrée au modèle. 53
Figure 58 - Génération de primitives à partir de nuages de points 3D 54
Figure 59 - Exemple de simulation de volume sur les coupes 3D dans Google Sketchup 55
Figure 60 - comparaison de texturage générique sur un mur du site et une surface plane sous Google Sketchup 56
Figure 61 - Exemple d'habillage du modèle 3D 56
Figure 62 - schéma récapitulatif de l'étape de réduction des maillages 57
Figure 63 - Exemple de panorama créé à partir de 49 photos 58
Figure 64 - Fenêtre de liaison entre les panoramiques : points chauds et liaisons (*Hotspots*) 58
Figure 65 - Interfaces des propriété des *hotspots*, panoramas, et du projet 58
Figure 66 - Extrait d'une visite panoramique virtuelle et exemple de hotspots 59
Figure 67 - Visualisation des éléments unitaires et zoom sur l' « Œil de la sorcière » 59
Figure 68 - Exemple de données intégrées sous forme "multipatch" 60
Figure 69 - Exemple de données intégrées en "polyfaces" 61

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- Comparatif de scanners laser terrestres 16
Tableau 2 - Listing des avantages et inconvénients du levé par lasergrammétrie terrestre 16
Tableau 3 - Avantages et inconvénients de l'utilisation de Google Sketchup pour la modélisation 20
Tableau 4 - Comparatif d'outils d'extraction de points 3D par photogrammétrie 25
Tableau 5 - Comparatif du plugin Curviloft et du maillage manuel 34
Tableau 6- Exemple de modes d'intégration selon les objets 61

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

OUVRAGES ARTICLES ET THESES

Adauhr (Agence Départementale d'Aménagement et d'Urbanisme du Haut Rhin) [2006], Etude de mise en valeur des ruines du Château de Thann, projet de synthèse. 44 pages

Burnouf J., Arribet-Deroin D., Desachy B., Joutnot F. et Nissen-Jaubert A. [2009], Manuel d'archéologie médiévale et moderne. Editions Armand Colin, Paris. ISBN 978-2-200-35455-8. 352 pages

Desachy B. [2004], Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie, L'informatique au service de l'archéologie. Editions du temps, Nantes. ISBN 2-84274-290-7. Pages 170 à 190 sur 382

Ehretsmann M. [1995], Cahiers Alsaciens d'archéologie et d'histoire, analyse architecturale de l'Engelbourg à Thann (Haut Rhin) Campagne de sondage archéologiques 1992. Edité par la Société pour la Conservation des Monuments Historiques d'Alsace, n°38

Feyler G. [1987], Contribution à l'histoire des origines de la photographie archéologique : 1839 – 1880, Mélanges de l'Ecole Française de Rome Antiquité (MEFRA). Volume 99.Page 66 sur 1047

Galinié H., Husi P., Rodier X., Theureau C., Zadora-Rio E. [2005], ARSOL, La chaine de gestion des données de fouilles du Laboratoire Archéologique et Territoires, Les petits cahiers d'Anatole, n°17, mai 2005

Grussenmeyer P., Landes T. [2011], Images et modèle 3D en milieux naturels, Lasergrammétrie terrestre. Collection EDYTEM, Laboratoire EDYTEM, n° 12, juin 2011. Pages 11 à 28 sur 206. ISBN 978-2-918435-04-4

Koehl M., **Grussenmeyer P.** [2008], 3D model for historic reconstruction and archaeological knowledge dissemination: The Niedermunster abbey's project (Alsace, France). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XXXVII. Part B5. Beijing

Koch J. [2010], Rapport de Diagnostic, Thann Haut Rhin, Château de l'engelbourg. Pole Archéologique Interdépartemental Rhénan, n° opération 5525

Ligny F. [2004], Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie, Le dessin archéologique. Editions du temps, Nantes. ISBN 2-84274-290-7. Pages 191 à 194 sur 382

Meyer E. [2007], Acquisition 3D, documentation et restitution en archéologie, Proposition d'un modèle de Système d'Information dédié au patrimoine. Thèse de doctorat, Centre de recherche en Architecture et Ingénierie –CRAI

Pierrot Deseilligny M., Clery I. [2011], Images et modèle 3D en milieux naturels, Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photos des milieux naturels. Collection EDYTEM, Laboratoire EDYTEM, n° 12, juin 2011. ISBN 978-2-918435-04-4

Racinet P. [2004], Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie, Photographie et archéologie. Editions du temps, Nantes. ISBN 2-84274-290-7. Pages 200 à 208 sur 382

Remondino F. [2011], Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning, Remote Sensing, ISSN 2072-4292

Santacana i Mestre J. et Carme Belarte Franco M. [2005], Idées et débats de la restitution en archéologie, Problèmes généraux concernant la restitution en archéologie. Centre des Monuments Nationaux, Editions du Patrimoine. Pages 6 à 10 sur 299

DOCUMENTS DE FORMATION

Borderie Q. et Subsol G. [2010], 3D et archéologie, ATER Université de Paris 1 et CNRS Montpellier

El Kahza L. et Hafa R. [2010], La lasergrammétrie et la photogrammétrie terrestre : deux technologie concurrentielles ou complémentaires ? Mémoire de master, IAV Hassan II, Rabat, Maroc

Giligny F. [2006], Méthodes de l'archéologie, Université de Paris 1 – UFR d'Histoire de l'Art et d'Archéologie, Licence d'archéologie, 2ème année

Grussenmeyer P. [2003], Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine culturel, Revue de l'Association Française de Topographie, N°95

Koehl M. [2008], Introduction au SIG, INSA Strasbourg, topographie, 3ème année

Landes T. [2010], Lasergrammétrie terrestre, INSA Strasbourg, topographie, 4ème année

Le Frapper O. [2010a], AutoCAD 2010, Conception dessin et présentation, Tous les outils et fonctionnalités avancées. Edition ENI, France. ISBN 978-2-7460-5384-7. 670 pages

Le Frapper O. [2010b], AutoCAD 2011, Conception dessin et présentation, Tous les outils et fonctionnalités avancées. Edition ENI, France. ISBN 978-2-7460-5809-5. 694 pages

Miller R. [2005], Université de Liège

Ministère de la Culture et de la Communication [sept.2008], Marquage des collections publiques guide méthodologique : évaluation des produits et procédés de marquage. 50 pages

Poitevin V. [2010], Mise en valeur de la forteresse médiévale de Châtel sur Moselle. Mémoire de diplôme d'ingénieur, INSA Strasbourg, 60 pages.

SITES INTERNET

@Arc3D [2007], service web de reconstruction virtuelle 3D à partir de photographies. Consultation : 2011

URL : http://www.arc3d.be

@Archaero [2007], Archéologie aérienne. Consultation : 2011.

URL : http ://archaero.com/

@Archeo.ens [2011], Archéologie d'Orient et d'Occident et textes anciens (AOROC). Consultation : 2011

URL : http ://www.archeo.ens.fr/

@Archeologie [2008], Le travail des archéologues, de la fouille à l'interprétation. Consultation : 2011

URL : http ://archeologies.free.fr

@Archeostudio [2011], Visualisation de reconstitutions archéologiques 3D. Consultation : 2011

URL : http ://www.archeostudio.net

@Articque [2011], Site de l'entreprise Articque, proposant des solutions et des services pour la gestion de bases de données. Consultation : 2011

URL: http://www.articque.com/solutions/outils-c-et-d/num.html

@cnig.serveur-1 [2008], Page internet décrivant la constitution de données cartographiques par photogrammétrie. Consultation : 2011

URL : http://www.cnig.serveur-1.net/fiches/16CparPhotogramm.htm

@Diffusion.ens [2005], Guyot A. Les méthodes de prospection, l'archéologie en chantier. Consultation : 2011

URL : http://www.diffusion.ens.fr

@Geospatialfrance [2011], Blog « Géospatial – Made in France », crée par Gwenael Bachelot et consacré à l'actualité géospatiale et aux technologies Autodesk. Consultation : 2011

URL: http://geospatialfrance.typepad.com/geospatialfrance/autodesk-labs/

@Gim-international [2011], site internet de la revue de géomatique *GIM international*. Consultation : 2011.

URL :http://www.gim-international.com/productsurvey/id41-Terrestrial_Laser_Scanners,_August.html

@Granddictionnaire [2011], Site internet de l'Office québécois de la langue française. Consultation : 2011

URL : http://www.granddictionnaire.com

@Héritage-virtuel [2011], Entreprise de modélisation numérique et réalité virtuelle. Consultation : 2011

URL : http ://www.heritage-virtuel.com

@Infodoc.inserm [2009], Serveur d'informations scientifiques de l'Institut National de la Sante Et de la Recherche médicale. Consultation : 2011.

URL: http://infodoc.inserm.fr/formation/Module-2/module2_mcd.htm

@Opensourcephotogrammetry [2011], Site de solutions open source pour la photogrammétrie 3D. Consultation : 2011

URL: http://opensourcephotogrammetry.blogspot.com/

@Phototour [2010], Site descriptif du logiciel Bundler et Manuel d'utilisation de la version v0.9. Consultation : 2011.

URL : http://phototour.cs.washington.edu/bundler/

URL: http://phototour.cs.washington.edu/bundler/bundler-v0.3-manual.html

@MaisonRene-Ginouves [2011], Organisme de recherche sur l'archéologie et l'ethnologie. Consultation : 2011

URL : http ://www.mae.u-paris10.fr

@RasterToVecteur [2011], Description des fonctionnalités du logiciel Raster2Vector et téléchargement. Consultation: 2011

URL: http://www.cnccontrols.com/raster2vector.asp

@Rubylibrarydepot [2011], Bibliothèque en ligne de plugins SketchUp-Ruby, hébergée par le CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie). Consultation : 2011

URL : http ://rhin.crai.archi.fr/rld

@Seig.ens.ing [2009], Serveur éducatif de l'ING et de l'ENSG. Consultation : 2011

URL : http://seig.ensg.ign.fr

@Sketchup.google [2011], Site internet officiel dédié au logiciel de dessin *Google SketchUp*. Consultation : 2011

URL : http ://sketchup.google.com

@Sketchucation [2011], Forum dédiés au logiciel *Google SketchUp*. Consultation : 2011

URL : http ://news.sketchucation.com

@Ville-Thann [2011], Site internet officiel de la commune de Thann, Alsace. Consultation : 2011

URL: http ://www.ville-thann.fr

@Vectormagic [2009] site du logiciel de vectorisation *VectorMagic* avec possibilité de tester le logiciel. Consultation: 2011

URL: http://vectormagic.com

@Wiseimage [2008], Site officiel des logiciels professionnels RasTech dont *WiseImage* est une gamme. Consultation : 2011

URL :http ://www.rastertech.fr/index.php

INSA Strasbourg

Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg

Projet de Fin d'Etudes en Topographie

Auteur : Solveig BERGER | Promotion : 2011

Titre : Etude de la modélisation d'une maquette 3D et de l'intégration de données.
Application au projet archéologique et patrimonial de Thann (Alsace).

Soutenance : 21 Septembre 2011

Structure d'accueil : INSA de Strasbourg

Nombre de volumes : 2 | Nombre de pages : 112

Nombre de références bibliographiques : 50

Résumé :

Le château de l'Engelbourg (Thann, Alsace), aujourd'hui en ruines, fait l'objet d'un vaste projet de valorisation patrimoniale, artistique et touristique initié par la ville de Thann. Elle collabore notamment avec le Pôle Archéologique Interdépartemental Rhénan, en charge de l'étude archéologique. Dans ce contexte, l'équipe TRIO/INSA du laboratoire LSIIT est intervenue pour étudier les méthodes de réalisation d'une maquette 3D du site, d'intégration de données archéologiques 2D, et les dérivés possibles de ces résultats.
Ce mémoire décrit les étapes d'acquisition de données par lasergrammétrie et photogrammétrie, de traitements des données, de réalisation du modèle 3D, et d'intégration des données archéologiques 2D par vectorisation. Nous avons également étudié les usages possibles (visites virtuelles, panoramas, etc.), et notamment les processus d'intégration du modèle 3D dans un SIG.
Dans une démarche de pérennisation de ce projet, nous avons veillé à porter un regard critique sur toutes les méthodes utilisées et décrire clairement les principaux procédés mis en place.

Mots clés : Archéologie**,** lasergrammétrie terrestre, restitution 3D par photogrammétrie, traitement de données, modélisation 3D, vectorisation, panorama et visite virtuelle, Système d'Information Géographique

Summary :

The Engelbourg Castle (Thann, Alsace) now in ruins is the subject of a wide-ranging project of heritage, artistic and touristy development, initiated by the city of Thann. It works in particular with the Inter-Rhine Archaeological Pole (PAIR), in charge of the archaeological survey. In this context, the TRIO/INSA research team from the LSIIT laboratory, stepped in to study the area 3D model conception, 2D archaeological data integration from vectorization methods, and what can be done from this.
This dissertation describes the stages of lasergrammetric and photogrammetric data acquisition, 3D modeling conception and 2D archaeological data integration. Possible usages such as panoramas and virtual visits were considered, and emphasis was also focused on the 3D model integration in the GIS processing.
In order to make durable this project, the tested methods were approached critically and the main procedures are clearly described.

Key words : Archaeology, terrestrial laser scanning, 3D restitution by photogrammetry, data processing, 3D modelling, vectorization, panorama and virtual visit, GIS